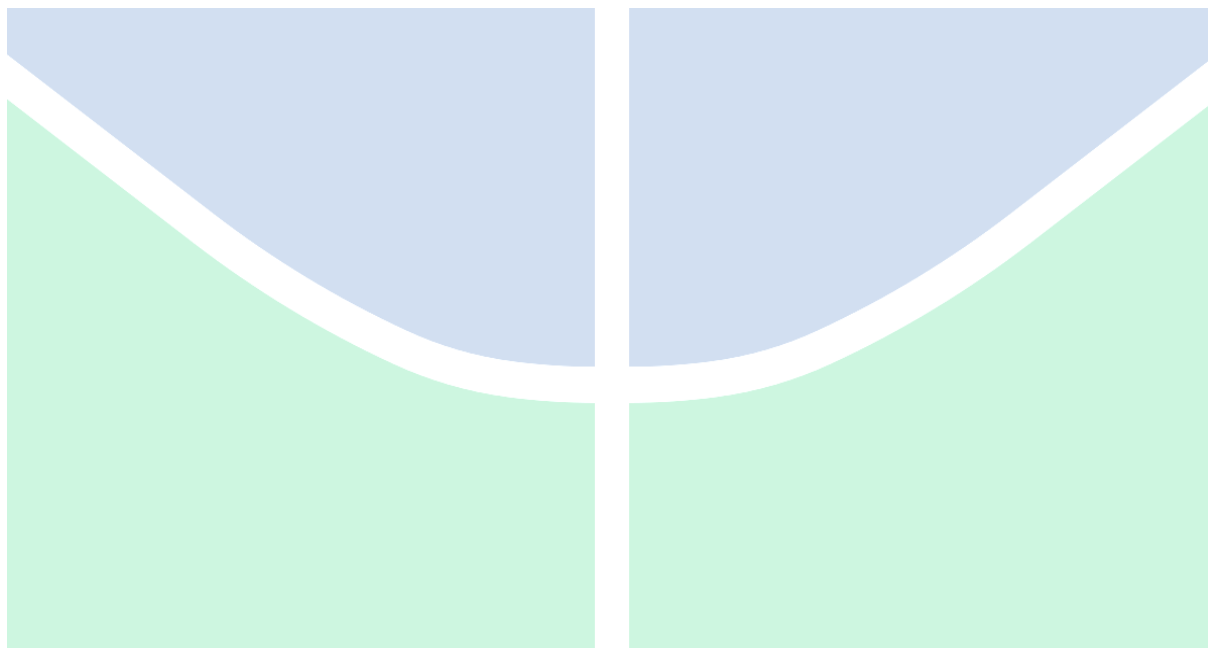




**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES FORMADOS POR PLACAS PERFURADAS DE GFRP PARA
PAINÉIS SANDUÍCHE**

JOHN KENNEDY FONSECA SILVA

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**BRASÍLIA –DF
SETEMBRO – 2025**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – ENC
PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL – PECC

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES FORMADOS POR PLACAS PERFURADAS DE GFRP PARA
PAINÉIS SANDUÍCHE**

JOHN KENNEDY FONSECA SILVA

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS
COORIENTADORA: MARIA ISABEL BRITO VALENTE

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF
SETEMBRO – 2025

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
CONECTORES FORMADOS POR PLACAS PERFURADAS DE GFRP PARA
PAINÉIS SANDUÍCHE**

JOHN KENNEDY FONSECA SILVA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

Profº. Rodrigo de Melo Lameiras, Dr. (Universidade de Brasília)
(Orientador)

Profª. Maria Isabel Brito Valente, Dra. (Universidade do Minho – Portugal)
(Coorientadora)

Profº. Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, Dr. (Universidade de Brasília)
(Examinador Interno)

Profº. Hidelbrando José Farkat Diógenes, Dr. (Universidade Federal da Paraíba)
(Examinador Externo)

Profº. José Alexandre Gouveia Henriques, Dr. (Universiteit Hasselt – Bélgica)
(Examinador Externo)

Brasília – DF, 18 de setembro de 2025.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JOHN KENNEDY FONSECA

Análise experimental do comportamento mecânico de conectores formados por placas perfuradas de GFRP para painéis sanduíche. [Distrito Federal] 2025.

xxvi, 322 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2025).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Polímero Reforçado com Fibra (PRF)

2. Concreto Armado

3. Estruturas Compósitas

4. Conectores

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, J. K. F. (2025). Análise experimental do comportamento mecânico de conectores formados por placas perfuradas de GFRP para painéis sanduíche, Publicação TD 04A/25, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 309 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: John Kennedy Fonseca Silva

TÍTULO: Análise experimental do comportamento mecânico de conectores formados por placas perfuradas de GFRP para painéis sanduíche.

GRAU: Doutor ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

John Kennedy Fonseca Silva

Para Patrícia

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, professor Rodrigo Lameiras, e à coorientadora, professora Isabel Valente, pelo suporte, pela confiança e pela direção segura ao longo do desenvolvimento desta tese.

Aos coordenadores de laboratório, professor Marcos Honorato e professora Valdirene Capuzzo, e aos técnicos Patrícia Falcão e Sr. Magno Cavalcante, pelo apoio nas rotinas de laboratório. Ao Gilson Xavier, profissional responsável pela montagem das fôrmas e das armaduras. À coordenadora do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC), professora Michele Carvalho e ao servidor da secretaria do PECC, Vitor Nogueira, pela atenção às demandas administrativas.

Ao professor Wanderley Nicácio, pela cessão do Laboratório de Engenharia Civil do Instituto Federal de Brasília (IFB) para a realização de parte dos ensaios desta tese, e ao técnico de laboratório Sr. Cláudio Costa, pelo acompanhamento na execução dos referidos ensaios.

Aos professores examinadores da banca, professor Ramon Silva, professor Hidelbrando Diogenes e professor José Henriques, pelas valiosas contribuições ao texto final desta tese.

Ao colega Wallas Araújo, que em diversas ocasiões prestou apoio durante as concretagens e a execução dos ensaios experimentais. Aos colegas do grupo de pesquisa *Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures*, liderado pelo professor Rodrigo, pelo auxílio nas concretagens e nos ensaios, em especial: Luana Borges, Matheus Cardoso, Layanne Souza e Geovanna Oliveira. Aos engenheiros Paulo Santana, Raí Barbosa, Geovany Barrozo e Mara Pereira, pelas contribuições nas etapas de concretagem. Ao aluno de graduação Ruan Noletto, pelo apoio durante a execução dos ensaios. Ao representante discente Matheus Silva, pela constante disponibilidade em auxiliar os colegas em suas demandas junto às instâncias do Programa.

Aos colegas do PECC que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e que, por lapso de memória, não cito nominalmente, registro aqui meu sincero agradecimento. Aos professores do Programa, pelas lições que formaram a base deste estudo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

À minha família e aos amigos, pelo apoio e incentivo constantes. À minha noiva, Patrícia Silva, por seu amor, compreensão e paciência; por caminhar ao meu lado em cada etapa deste percurso e por transformar cansaço em coragem e rotina em sentido. Esta conquista é nossa. A Deus, fonte de vida e inspiração, a minha gratidão.

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONECTORES FORMADOS POR PLACAS PERFURADAS DE GFRP PARA PAINÉIS SANDUÍCHE

Autor: John Kennedy Fonseca Silva

Orientador: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília – DF, 18 de setembro de 2025.

A presente pesquisa investigou o comportamento mecânico de conexões formadas por conectores do tipo PERFOFRP (*perforated* GFRP), aplicados em painéis sanduíche de concreto pré-moldado, por meio de um programa experimental abrangente e da formulação de modelos analíticos de previsão da resistência. O estudo envolveu quatro séries de ensaios de cisalhamento duplo, totalizando 70 corpos de prova, concebidos para avaliar os efeitos da disposição e do diâmetro dos furos, da distância entre furos e bordas, da espessura do reforço de PRFV e da introdução de modificações artificiais nos mecanismos resistentes. A diversidade de configurações ensaiadas possibilitou compreender, de forma sistemática, como cada parâmetro geométrico ou mecanismo contribui para a resposta força–deslocamento, para a rigidez inicial, para a capacidade última e para a dissipação de energia das conexões.

Os resultados experimentais revelaram que a geometria dos furos exerce impacto decisivo tanto sobre a propagação das fissuras quanto sobre a ductilidade e a energia absorvida. Conectores com maior espaçamento entre furos ou com espessura intermediária de reforço mostraram desempenho mais equilibrado, enquanto disposições muito rígidas ou excessivamente reforçadas resultaram em comportamento frágil. A aderência entre PRFV e concreto foi identificada como o mecanismo de maior influência na resistência. Além disso, os ensaios confirmaram que o número de perfurações tem efeito mais expressivo sobre a fissuração e a dissipação de energia do que o diâmetro isoladamente.

Com base nas evidências experimentais, foram propostos modelos analíticos capazes de estimar a capacidade última dos conectores PERFOFRP considerando diferentes modos de ruptura: cisalhamento dos pinos de concreto, falha do PRFV na região entre camadas de concreto, ruptura do PRFV confinado e perda de aderência. As equações apresentaram boa correlação com os resultados de ensaio, com erros médios inferiores a 16% em diversos casos,

demonstrando potencial para aplicação prática no dimensionamento de painéis sanduíche com esse tipo de conector.

As contribuições principais deste trabalho incluem a definição de um banco experimental inédito para conectores PERFOFRP, a identificação de parâmetros geométricos e mecanismos mais influentes na resistência e na ductilidade, e a proposição de modelos de previsão fundamentados em princípios mecânicos e validados experimentalmente. Por outro lado, as conclusões estão limitadas às configurações ensaiadas, em especial aos conectores fabricados com PRFV de 2 mm e 4 mm de espessura, com diâmetros variando entre 12 mm e 19 mm e arranjos geométricos específicos.

Em síntese, a pesquisa fornece subsídios relevantes para o desenvolvimento de painéis sanduíche mais eficientes do ponto de vista estrutural, contribuindo para o avanço do emprego de materiais compósitos em sistemas construtivos pré-moldados. Os resultados reforçam a viabilidade técnica dos conectores PERFOFRP e oferecem ferramentas para seu dimensionamento, mas também apontam a necessidade de investigações complementares (experimentais, analíticas e numéricas) que ampliem a aplicabilidade prática dos modelos e consolidem sua adoção em projetos de engenharia.

Palavras-chave: painéis pré-moldados de concreto com isolamento incorporado, conectores de cisalhamento; polímero reforçado com fibras de vidro; ensaios de cisalhamento duplo.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF GFRP PERFORATED PLATE CONNECTORS FOR SANDWICH PANELS

Author: John Kennedy Fonseca Silva

Supervisor: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília - DF, September 18, 2025.

This research investigated the mechanical behavior of connections formed by PERFOFRP (perforated GFRP) connectors, applied in precast concrete sandwich panels, through a comprehensive experimental program and the formulation of analytical models for strength prediction. The study comprised four series of double-shear tests, totaling 70 specimens, designed to evaluate the effects of hole arrangement and diameter, hole-to-edge distance, FRP reinforcement thickness, and the introduction of artificial modifications to the resistant mechanisms. The diversity of tested configurations made it possible to systematically understand how each geometric parameter or mechanism contributes to the load–slip response, initial stiffness, ultimate strength, and energy dissipation of the connections.

The experimental results revealed that hole geometry has a decisive impact on both crack propagation and the ductility and energy absorption of the connections. Connectors with larger hole spacing or intermediate reinforcement thickness exhibited more balanced performance, whereas very rigid or excessively reinforced configurations resulted in brittle behavior. Adhesion between GFRP and concrete was identified as the most influential mechanism in the resistance. In addition, the tests confirmed that the number of perforations had a more significant effect on cracking and energy dissipation than hole diameter considered in isolation.

Based on the experimental evidence, analytical models were proposed to estimate the ultimate capacity of PERFOFRP connectors, considering different failure modes: shear of concrete dowels in the holes, failure of GFRP in the region between concrete layers, failure of confined GFRP, and loss of adhesion at the GFRP–concrete interface. The equations showed good correlation with the test results, with mean errors below 16% in several cases,

demonstrating potential for practical application in the design of sandwich panels with this type of connector.

The main contributions of this work include the definition of an unprecedented experimental database for PERFOFRP connectors, the identification of the most influential geometric parameters and mechanisms in resistance and ductility, and the proposal of prediction models grounded in mechanical principles and experimentally validated. On the other hand, the conclusions are limited to the tested configurations, particularly connectors manufactured with GFRP thicknesses of 2 mm and 4 mm, with hole diameters ranging from 12 mm to 19 mm and specific geometric arrangements.

In summary, this research provides relevant insights for the development of structurally more efficient sandwich panels, contributing to the advancement of composite materials in precast construction systems. The results reinforce the technical feasibility of PERFOFRP connectors and provide tools for their design, while also highlighting the need for complementary investigations (experimental, analytical, and numerical) to broaden the practical applicability of the models and consolidate their adoption in engineering projects.

Keywords: precast concrete sandwich panels; shear connectors; glass fiber reinforced polymer; double shear tests.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
EF	Elementos Finitos
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
PCI	<i>Precast Concrete Institute</i>
PERFOFRP	<i>Perforated Glass Fiber Reinforced Polymer Plates</i>
PIR	<i>Polyisocyanurate</i>
PRF	Polímero Reforçado com Fibras
PRFB	Polímero Reforçado com Fibras de Basalto
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibras de Vidro
PU	<i>Polyurethane</i>
SFRSCC	<i>Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete</i>
SRF	<i>Stitched Roving Fabric</i>
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CSM	<i>Chopped Strand Mat</i>
EPS	<i>Expanded Polystyrene</i>
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
PCI	<i>Precast Concrete Institute</i>
PERFOFRP	<i>Perforated Glass Fiber Reinforced Polymer Plates</i>
PIR	<i>Polyisocyanurate</i>
PRF	Polímero Reforçado Com Fibras
PRFB	Polímero Reforçado com Fibras de Basalto
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
PU	<i>Polyurethane</i>
SFRSCC	<i>Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SRF	<i>Stitched Roving Fabric</i>
U1	Deslocamento no ABAQUS na direção x
U2	Deslocamento no ABAQUS na direção y
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Réplica A do conector
B	Réplica B do conector
C	Réplica C do conector
C_{TL}	Designação para identificar o grupo controle
D1	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva, com comportamento frágil, que não se enquadra nas categorias D2 ou D3
D2	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva que apresenta capacidade de deformação superior ou igual 6,0 mm e inferior a 10,0 mm
D3	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva que apresenta capacidade de deformação superior ou igual 10,0 mm

D_h	Diâmetro dos furos
EI	Rigidez à flexão do painel
f	Graus de liberdade do denominador
f	Grau de liberdade do denominador
FC	Componente rotulado referente ao painel teoricamente totalmente compósito
H_0	Hipótese nula
H_0	Hipótese Nula
H_1	Hipótese alternativa
H_1	Hipótese Alternativa
h_c	Altura do conector
k	Número de grupos ou tratamentos distintos
k_{EI}	Percentual de ação compósita em termos de rigidez
K_f	Rigidez inicial de um conector
K_{sc}	Rigidez inicial de um conector (para classificação em relação à ductilidade)
k_u	Percentual de ação compósita em termos de resistência
M_t	Identificação do material do conector
M_u	Momento último do painel
N	Número total de observações
NC	Componente rotulado referente ao painel teoricamente não compósito
n_c	Quantidade de conectores
n_f	Quantidade de camadas de mantas de fibras de vidro
n_h	Média ponderada de réplicas por grupo
n_{ho}	Número de furos em cada região de GFRP ancorado
n_i	Número total de observações no i -ésimo tratamento
p	Número de médias incluídas em uma comparação
p	Número de médias incluídas no teste de Duncan
P_e	Capacidade última de um conector (para classificação em relação à ductilidade)
P_{Rk}	Força característica de conector (para classificação em relação à ductilidade)
$Q_{lo.e}$	Capacidade de carga no limite do regime elástico
$Q_{lo.u}$	Capacidade última de um conector
Q_{ME}	Quadrado médio entre tratamentos
Q_{MR}	Quadrado médio residual
r	Designação para as réplicas dos conectores
r	Indica as réplicas dos conectores
R^2	Coefficiente de determinação
R_p	Diferença mínima significativa
S_b	Distância entre o centro dos furos e a borda interna do conector
S_c	Espaçamento entre conectores
S_h	Espaçamento entre os furos, tomando como referência o centro das perfurações
$S_{lo.e}$	Deslizamento no limite do regime elástico
S_{QE}	Soma dos quadrados entre tratamentos
S_{QR}	Soma dos quadrados residual
S_{QT}	Soma dos quadrados total
$S_{\bar{x}_i}$	Erro padrão do valor médio
$test$	Componente rotulado referente ao resultado experimental
t_r	Espessura do reforço adicionados à região de GFRP exposta
V_α	<i>Studentized range statistic</i>
x	Eixo das abscissas
$\bar{x}_{(i)}$	Médias incluídas em uma comparação
y	Eixo das ordenadas

α	Fator de delimitação do regime elástico
δ_{ek}	Deslizamento relativo correspondente a P_{rk} no ramo crescente de uma curva
$\Delta Q_{lo,ie}$	Acréscimo de força no regime inelástico
$\Delta S_{lo,ie}$	Acréscimo de deslizamento no regime inelástico
δ_{uk}	Deslizamento relativo correspondente a P_{rk} no ramo decrescente de uma curva
D1	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva, com comportamento frágil, que não se enquadra nas categorias D2 ou D3
D2	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva que apresenta capacidade de deformação superior ou igual 6,0 mm e inferior a 10,0 mm
D3	Categoria de ductilidade que se refere a uma curva que apresenta capacidade de deformação superior ou igual 10,0 mm
D_h	Diâmetro dos furos
dL	Comprimento de uma parte do painel sanduíche
EI	Rigidez à flexão efetiva do painel
f	Graus de liberdade do denominador
FC	Componente rotulado referente ao painel teoricamente totalmente compósito
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
h_c	Altura do conector
k_{EI}	Percentual de ação compósita em termos de rigidez
K_f	Rigidez inicial de uma curva utilizada para a classificação de sua ductilidade
k_u	Percentual de ação compósita em termos de resistência
M_t	Identificação do material do conector
M_u	Momento último do painel
N	Número total de observações
NC	Componente rotulado referente ao painel teoricamente não compósito
n	Número de identificação da amostra
n_c	Quantidade de conectores
n_f	Quantidade de camadas de fibras de vidro
n_h	Número de furos em cada região de GFRP ancorado
n_i	Número total de observações no i -ésimo tratamento
p	Número de médias incluídas em uma comparação
P_e	Capacidade última de uma curva utilizada para a classificação de sua ductilidade
P_{Rk}	Força característica de uma curva utilizada para a classificação de sua ductilidade
Q_{lo}	Resistência ao cisalhamento
Q_{ME}	Quadrado médio entre tratamentos
Q_{MR}	Quadrado médio residual
r	Designação para as réplicas dos conectores
S_b	Distância entre o centro dos furos e a borda interna do conector
S_h	Espaçamento entre os furos, tomando como referência o centro das perfurações
S_n	Código identificador das séries experimentais
S_{QE}	Soma dos quadrados entre tratamentos
S_{QR}	Soma dos quadrados residual
S_{QT}	Soma dos quadrados total
$test$	Componente rotulado referente ao resultado experimental
t_r	Espessura do reforço adicionados à região exposta de GFRP
u	Componente rotulado referente à capacidade última
δ_{ek}	Deslizamento relativo correspondente a P_{rk} no ramo crescente da curva
δ_{uk}	Deslizamento relativo correspondente a P_{rk} no ramo decrescente da curva

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de um painel sanduíche destacando os componentes principais, incluindo conectores PERFOFRP.	6
Figura 2.2 – Processo construtivo da obra <i>Saginaw Gardens Apartment</i> , no Canadá: (a) operários trabalhando sobre um pavimento; (b) içamento de um painel sanduíche; (c) montagem das paredes da fachada de um pavimento; (d) içamento de um elemento pré-moldado; (e) finalização do último pavimento; e (f) edificação concluída (CANADIAN PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 2015).	7
Figura 2.3 – Representação de painéis sanduíche com conectores em formato de barras, adaptado de Naito <i>et al.</i> (2012): (a) ação compósita após a aplicação de força; e (b) desenvolvimento de tensões de cisalhamento entre as camadas de concreto.	9
Figura 2.4 – Exemplos de painéis sanduíche, adaptado de O’Hegarty e Kinnane (2020): (a) autoportantes suportando painéis e lajes dos pavimentos superiores; (b) autoportantes suportando apenas os painéis; e (c) não autoportantes suportando apenas o próprio peso.	12
Figura 2.5 – Tipos de conectores constituídos por GFRP: (a) formato em “C” (MAXIMOS <i>et al.</i> , 2007); (b) barras treliçadas (OH; JANG; YUN, 2013); (c) barras com nervuras (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (d) barras roscadas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (e) pinos (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (f) barras treliçadas (CHOI, KI BONG <i>et al.</i> , 2015); (g) barras treliçadas (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (h) pino compósito (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (i) cruz (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (j) chapa corrugada (AL-RUBAYE <i>et al.</i> , 2018); (k) malha (CHOI, WONCHANG; JANG; YUN, 2019); e (l) pino com seção em cruz (HUANG, JUNQI <i>et al.</i> , 2020).	22
Figura 2.6 – Modos de ruptura do conector PERFOFRP: (a) ruptura do GFRP nas extremidades; (b) ruptura do GFRP na região entre camadas de concreto; (c) ruptura do GFRP ancorado no concreto; e (d) ruptura dos pinos de concreto.	26
Figura 2.7 – Conectores PERFOFRP com ruptura no GFRP na região entre camadas de concreto com furos com diâmetros de (SILVA, 2020): (a) 12,70 mm; (b) 25,40 mm; (c) 31,75 mm; e (d) sem furos.	27
Figura 2.8 – Capacidade última dos conectores da pesquisa de Silva (2020).	28
Figura 2.9 – Conectores ensaios por Huang e Dai (2019) com dimensões de: (a) 166 mm por 160 mm e de (b) 166 mm por 100 mm; e (c) aspecto dos conectores após realização dos ensaios <i>push-out</i>	30
Figura 2.10 – Conectores fabricados com resina poliéster e fibras de curauá, produzidos por Araújo (2023), com gramaturas de: (a) 1800 g/m ³ ; (b) 2250 g/m ² ; e (c) 2750 g/m ²	31
Figura 2.11 – Modos de ruptura observados nos conectores PERFOFRP testados por Lameiras (2015): (a) ruptura no GFRP ancorado; (b) ruptura na frente de concreto; e (c) ruptura por deslizamento.	32
Figura 3.1 – Processo de fabricação das chapas de GFRP utilizando a técnica de infusão por resina à vácuo.	45
Figura 3.2 – Processo de fabricação dos conectores a partir das chapas de GFRP: (a) chapa bruta de GFRP; (b) corpo de prova para caracterização; (c) exemplo de conector fabricado; (c) exemplo de modelo genérico de conector parametrizado por meio das distâncias S_h e S_b , com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	46
Figura 3.3 – Montagem dos corpos de prova: (a) disposição dos componentes nas fôrmas; (b) corpos de prova após concretagem; (c) corpo de prova da Série 3 com o material isolante removido; (d) corpos de prova das Séries 1, 2 e 4 com placas de aço fixadas na região de GFRP na região entre camadas de concreto.	48
Figura 3.4 – Geometria dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento duplo: (a) vista superior; e (b) seção transversal, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	49

Figura 3.5 – Representação tridimensional dos corpos de prova para ensaios <i>push-out</i> : (a) corpo de prova completo; (b) com eliminação do concreto; (c) com retirada do material isolante; (d) com remoção total do material isolante e parcial da face frontal do concreto; (e) com eliminação total do material isolante e parcial da parte superior do concreto; e (f) com remoção total tanto do concreto quanto do material isolante.	50
Figura 3.6 – Equipamentos utilizados para execução do ensaio de cisalhamento duplo.	51
Figura 3.7 – Conectores da Série 1: (a) vista superior; e (b) vista frontal do conector do grupo controle, que não possui furos, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	54
Figura 3.8 – Vista frontal dos conectores, com perfurações, da Série 1: (a) S1-57-35; (b) S1-57-25; (c) S1-57-15; (d) S1-40-35; (e) S1-40-25; (f) S1-40-15; (g) S1-30-35; (h) S1-40-25; e (i) S1-40-15.	55
Figura 3.9 – Vista superior dos conectores da Série 2: (a) conectores fabricados em GFRP; e (b) conectores fabricados em aço, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	57
Figura 3.10 – Vista frontal dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP; (b) S2-FRP-EA; (c) S2-FRP-RH; (d) S2-FRP-EA/RH; (e) S2-A36-EA; e (f) S2-CTL, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	57
Figura 3.11 – Conectores da Série 3: (a) vista frontal conectores; e vistas superiores dos modelos (b) S3-0; (c) S3-2; (d) S3-4; (e) S3-6; e (f) S3-8, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	59
Figura 3.12 – Conectores da Série 4: (a) vista superior; e vistas frontais de diferentes modelos: (b) S4-19-1; (c) S4-19-2; (d) S4-16-3; e (e) S4-13-3, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].	61
Figura 3.13 – Comportamento força <i>versus</i> deslizamento relativo: (a) exemplo de curva média dos deslocamentos medidos em uma réplica; e (b) exemplo de curva média das réplicas para uma configuração de corpo de prova.	63
Figura 3.14 – Classificação das curvas conforme categoria de ductilidade: (a) D3, (b) D2 e (c) D1.	64
Figura 4.1 – Caracterização dos materiais: (a) ensaio de tração e determinação do módulo de elasticidade do GFRP; (b) corpo de prova de GFRP rompido à tração; (c) ensaio de compressão e obtenção do módulo de elasticidade do concreto; e (d) ensaio de tração por compressão diametral no concreto.	68
Figura 4.2 – Comportamento médio força <i>versus</i> deformação do GFRP utilizado na Série 1.	71
Figura 4.3 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deformação do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4: (a) barras de 8,0 mm; e (b) barras de 10,0 mm.	72
Figura 4.4 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-57-35-A; (b) S1-57-35-B; (c) S1-57-35-C; (d) S1-57-25-A; (e) S1-57-25-B; (f) S1-57-25-C; (g) S1-57-15-A; e (h) S1-57-15-B.	74
Figura 4.5 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-40-35-A; (b) S1-40-35-B; (c) S1-40-35-C; (d) S1-40-25-A; (e) S1-40-15-A; (f) S1-40-15-B; e (g) S1-40-15-C.	75
Figura 4.6 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-30-35-A; (b) S1-30-35-B; (c) S1-30-25-A; (d) S1-30-25-B; (e) S1-30-25-C; (f) S1-30-15-A; e (g) S1-30-15-B.	77
Figura 4.7 – Aspecto dos conectores após os ensaios de cisalhamento duplo: (a) S1-CTL-A; (b) S1-CTL-B; e (c) S1-CTL-C.	78
Figura 4.8 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	81

Figura 4.9 – Variação da extensão das fissuras [cm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos e a borda interna: (a) 15 mm; (b) 25 mm; e (c) 35 mm.	83
Figura 4.10 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos.	85
Figura 4.11 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda interna.	87
Figura 4.12 – Curvas força <i>versus</i> deslizamento relativo dos conectores da Série 1: (a) S1-57-35; (b) S1-57-25; (c) S1-57-15; (d) S1-40-35; (e) S1-40-25; e (f) S1-40-15.	89
Figura 4.13 – Curvas força <i>versus</i> deslizamento relativo dos conectores da Série 1: (a) S1-30-35; (b) S1-30-25; (c) S1-30-35- <i>r</i> ; (d) S1-CTL.	90
Figura 4.14 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 1: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; e (c) S1-30- S_b	92
Figura 4.15 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 1: (a) S1- S_h -35; (b) S1- S_h -25; e (c) S1- S_h -15.	93
Figura 4.16 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 1: S1- C_{TL}	94
Figura 4.17 – Curvas médias força <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 1 agrupadas por parâmetros geométricos: (a) S_h ; e (b) S_b	95
Figura 4.18 – Variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	98
Figura 4.19 – Variação do deslocamento na capacidade última capacidade [mm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	99
Figura 4.20 – Variação da rigidez inicial (K_f) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	101
Figura 4.21 – Variação da capacidade última [kN] nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	102
Figura 4.22 – Variação do deslizamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	104
Figura 4.23 – Variação da rigidez inicial[kN/mm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	105
Figura 4.24 – Variação da (a) capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e (c) rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1, por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	109
Figura 4.25 – Variação (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e (c) da rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1, por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	113
Figura 4.26 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furo e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	117
Figura 4.27 – Variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furo e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	119

Figura 4.28 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	120
Figura 4.29 – Variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	122
Figura 4.30 – Variação da (a) energia absorvida (W_{abs}) e da (b) energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1, em função do espaçamento entre furos (s_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	125
Figura 4.31 – Variação da (a) energia absorvida (W_{abs}) e da (b) energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1, em função do espaçamento entre furos e borda (s_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	128
Figura 4.32 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 1: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; (c) S1-30- S_b ; e (d) S1-CTL.	130
Figura 4.33 – Resultados de capacidade última em função da distância (a) entre furos e (b) entre furo e borda; energia absorvida em função da distância (c) entre furos e (d) entre furo e borda; e ductilidade em função da distância (e) entre furos e (f) entre furo e borda.	131
Figura 4.34 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 2: (a) S2-FRP-A; (b) S2-FRP-B; (c) S2-FRP-C; (d) S2-FRP-EA-A; (e) S2-FRP-EA-B; (f) S2-FRP-EA-C; (g) S2-FRP-RH-A; (h) S2-FRP-RH-B; (i) S2-FRP-RH-C; (j) S2-FRP-EA/RH-A; (k) S2-FRP-EA/RH-B; (l) S2-FRP-EA/RH-C.	137
Figura 4.35 – Representação visual da extensão das fissuras nos conectores da Série 2: médias ($\bar{x}$) e barras de erros representadas pelos desvios-padrão (s), de acordo com a configuração de cada conector.	139
Figura 4.36 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 2: (a) S2-FRP-EA-A; (b) S2-FRP-EA-B; (c) S2-FRP-EA-C; (d) S2-CTL-A; (e) S2-CTL-B; e (f) S2-CTL-C.	140
Figura 4.37 – Curvas força <i>versus</i> deslizamento relativo dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP- r ; (b) S2-FRP-EA- r ; (c) S2-FRP-RH- r ; (d) S2-FRP-EA/RH- r ; (e) S2-A36-EA- r ; (f) S2-CTL- r	142
Figura 4.38 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 2: (a) conectores sem eliminação da aderência entre o conector e o concreto; (b) conectores com eliminação da aderência entre o conector e o concreto.	143
Figura 4.39 – Capacidade última dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).	150
Figura 4.40 – Deslizamento na capacidade última dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).	151
Figura 4.41 – Rigidez inicial dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).	152
Figura 4.42 – Energia absoluta absorvida dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).	157
Figura 4.43 – Energia relativa absorvida dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).	158
Figura 4.44 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH; e (b) S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL.	160

Figura 4.45 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 3: (a) S3-0-A; (b) S3-0-B; (c) S3-0-C; (d) S3-2-A; (e) S3-2-B; (f) S3-2-C; (g) S3-4-A; (h) S3-4-B; (i) S3-4-C; (j) S3-6-A; (k) S3-6-B; (l) S3-6-C; (m) S3-8-A; (n) S3-8-B; e (o) S3-8-C.	164
Figura 4.46 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (t_r).	166
Figura 4.47 – Curvas força <i>versus</i> deslizamento relativo dos conectores da Série 3: (a) S3-0- r ; (b) S3-2- r ; (c) S3-4- r ; (d) S3-6- r ; e (e) S3-8- r	168
Figura 4.48 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 3: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; (c) S1-30- S_b ; (d) S1-CTL.	169
Figura 4.49 – Variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	173
Figura 4.50 – Variação do deslocamento na capacidade última capacidade ($S_{lo,u}$) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	174
Figura 4.51 – Variação da rigidez inicial (K_f) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	175
Figura 4.52 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	178
Figura 4.53 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	179
Figura 4.54 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 3: (a) S3-0; (b) S3-2; (c) S3-4; (d) S3-6; e (e) S3-8.	181
Figura 4.55 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 4: (a) S4-19-1-A; (b) S4-19-1-B; (c) S4-19-1-C; (d) S4-19-2-A; (e) S4-19-2-B; (f) S4-19-2-C; (g) S4-16-3-A; (h) S4-16-3-B; (i) S4-16-3-C; (j) S4-13-3-A; (k) S4-13-3-B; e (l) S4-13-3-C.	183
Figura 4.56 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função da: (a) quantidade de furos (n_{ho}); (b) diâmetro dos furos (D_h); e (c) área de perfuração (A_h).	185
Figura 4.57 – Curvas força <i>versus</i> deslizamento relativo dos conectores da Série 4: (a) S4-19-1; (b) S4-19-2; (c) S4-16-3; e (d) S4-13-3.	187
Figura 4.58 – Comportamento carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo da Série 4: (a) S4-19-1, S4-19-2 e S4-19-3; (b) S4-13-3, S4-16-3 e S4-19-3.	188
Figura 4.59 – Variação da: (a) capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) deslizamento na capacidade última, e (c) rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função da quantidade de furos.	192
Figura 4.60 – Variação: (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslizamento na capacidade última e (c) da rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função do diâmetros dos furos (D_h); e variação (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslizamento na capacidade última, e (c) da rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função área de perfuração (A_h).	193
Figura 4.61 – Variação da: (a) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (b) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função da quantidade de furos.	197
Figura 4.62 – Variação da: (a) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (b) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função do diâmetro dos furos (D_h); e (c) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (d) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função da área de perfuração (A_h).	198
Figura 4.63 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 4: (a) S4-19- n_h ; e (b) S4- D_h -3.	200
Figura 5.1 – Variação de K_t em função de R	213

Figura A.1 – Comportamento força <i>versus</i> deformação do GFRP utilizado na Série 1, com destaque para: (a) CPs 1 a 8; (b) CPs 9 a 16; (c) CPs 17 a 24; e (d) CPs 25 a 32.	240
Figura B.1 – Exemplo de obtenção (a) do coeficiente α , em função do coeficiente de determinação R^2 ; para (b) o cálculo dos coeficientes de rigidez elástico (K_e) e inelástico (K_{ie}).	243
Figura B.2 – Variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	248
Figura B.3 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	249
Figura B.4 – Variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	250
Figura B.5 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	251
Figura B.6 – Variação (a) do fator de delimitação do regime elástico (α) e do (b) coeficiente de rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	254
Figura B.7 – Variação (a) do fator de delimitação do regime elástico (α) e do (b) coeficiente de rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	257
Figura B.8 – Variação do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.	260
Figura B.9 – Variação do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.	261
Figura B.10 – Variação coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	264
Figura B.11 – Variação coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	267
Figura B.12 – Variação da força no limite elástico ($Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e	271
Figura B.13 – Variação do deslizamento no limite elástico ($S_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do deslizamento no limite elástico ($Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.	272
Figura B.14 – Variação do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.	274
Figura B.15 – Variação do deslizamento no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm;	

(b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do deslizamento no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.	276
Figura B.16 – Variação (a) da força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$); (b) do deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo.e}$); (c) do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$); e (d) do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$) dos conectores da Série 1, agrupados por S_h , independentemente de S_b	279
Figura B.17 – Variação da força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$), do deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo.e}$), do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) e do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$) dos conectores da Série 1, agrupados por S_b , independentemente de S_h	283
Figura B.18 – Rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2.	287
Figura B.19 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.	294
Figura B.20 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 4 em função da: (a) quantidade de furos; (b) diâmetro dos furos (D_h); e (c) área de perfuração (A_h).	301

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Critérios para classificação dos conectores com base na ductilidade, conforme prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024).	65
Quadro 4.1 – Influência da distância entre furos (S_h) e da distância entre furo e borda (S_b) na ductilidade D_n e na absorção de energia (W_{abs}) dos conectores.	134
Quadro B.1 – Proposta de classificação do coeficiente de determinação (R^2) para análise dos resultados experimentais de conectores em painéis sanduíche de concreto.	245

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados experimentais da capacidade última dos conectores analisados no estudo de Silva (2020).	27
Tabela 2.2 – Resultados de capacidade última dos ensaios <i>push-out</i> conduzidos por Huang e Dai (2019) em conectores PEFOFRP.	29
Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios <i>push-out</i> em conectores PERFOFRP fabricados com mantas do tipo CSM, conforme estudo de Lameiras (2015).	32
Tabela 3.1 – Estimativa de custos de materiais para a fabricação dos conectores PERFOFRP.	47
Tabela 3.2 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 1.	53
Tabela 3.3 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 2.	56
Tabela 3.4 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 3.	58
Tabela 3.5 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 4.	60
Tabela 4.1 – Resultados da caracterização mecânica dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.	69
Tabela 4.2 – Resultados da caracterização mecânica dos GFRPs utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.	70
Tabela 4.3 – Resultados da caracterização mecânica do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4.	71
Tabela 4.4 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) por configuração de conector.	79

Tabela 4.5 – Valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos.	84
Tabela 4.6 – Valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) da extensão das fissuras nos conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos e borda interna.	86
Tabela 4.7 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 1: capacidade última (Q_{lu}), deslocamento na capacidade última (S_{lu}) e rigidez inicial (K_f).	97
Tabela 4.8 – Capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	108
Tabela 4.9 – Capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	112
Tabela 4.10 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 1: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).	116
Tabela 4.11 – Energia absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida ($S_{lo,u}$) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	123
Tabela 4.12 – Energia absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida ($S_{lo,u}$) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos e borda (S_h), independentemente do espaçamento entre furos (S_b).	127
Tabela 4.13 – Parâmetros resultantes da modelagem das curvas, classificados de acordo com a ductilidade dos conectores da Série 1.	129
Tabela 4.14 – Resultados da ANOVA referentes à capacidade última, energia absorvida e extensão das fissuras dos conectores da Série 1.	132
Tabela 4.15 – Teste de Duncan para energia absorvida e extensão das fissuras.	132
Tabela 4.16 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 2: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), de acordo com a configuração de cada conector.	138
Tabela 4.17 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 2: capacidade última (Q_{lu}), deslocamento na capacidade última (S_{lu}) e rigidez inicial (K_f): valores individuais (x_n), valores médios ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).	147
Tabela 4.18 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 2: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).	155
Tabela 4.19 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 2 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).	159
Tabela 4.20 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 3: valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação por configuração de conector.	165
Tabela 4.21 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 3: capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última (S_{lu}) e rigidez inicial (K_f).	172

Tabela 4.22 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 3: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).....	177
Tabela 4.23 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 3 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).....	180
Tabela 4.24 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 4: valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação por configuração de conector.	184
Tabela 4.25 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 4: capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f).	190
Tabela 4.26 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 4: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).....	195
Tabela 4.27 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 4 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).....	199
Tabela 5.1 – Comparação entre os valores estimados pelo modelo, considerando a ruptura no GFRP confinado, e os resultados experimentais para conectores do tipo PERFOFRP.	210
Tabela 5.2 – Aplicação do fator de concentração de tensões (K_t) para ajuste da capacidade última de conectores PERFOFRP da Série 3.....	214
Tabela A.1 – Resultados da resistência à compressão dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.	235
Tabela A.2 – Resultados da resistência à tração dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.	236
Tabela A.3 – Resultados do módulo de elasticidade dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.	236
Tabela A.4 – Resultados da resistência à tração do GFRP utilizado na Série 1.....	237
Tabela A.5 – Resultados da resistência à tração do GFRP utilizado nas Séries 2, 3 e 4.....	238
Tabela A.6 – Resultados do módulo de elasticidade do GFRP utilizado na Série 1.....	238
Tabela A.7 – Resultados do módulo de elasticidade do aço das Séries 1, 2, 3 e 4.....	241
Tabela A.8 – Resultados da resistência ao escoamento do aço das Séries 1, 2, 3 e 4.....	241
Tabela A.9 – Resultados da resistência à ruptura do aço das Séries 1, 2, 3 e 4.	242
Tabela B.1 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).	246
Tabela B.2 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1: valores médios de K_e , fator α e R^2 , por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	252
Tabela B.3 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1: valores médios de K_e , fator α e R^2 , por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	256
Tabela B.4 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).	259
Tabela B.5 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1: valores médios de K_{ie} e R^2 , por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).	263
Tabela B.6 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1: valores médios de K_{ie} e R^2 , por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).	265

Tabela B.7 – $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v .	269
Tabela B.8 – $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v , agrupados por S_h , independentemente de S_b .	277
Tabela B.9 – $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v , agrupados por S_b , independentemente de S_h .	281
Tabela B.10 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).	286
Tabela B.11 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 2 por regressão linear até capacidade última ($Q_{lo,u}$): valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).	288
Tabela B.12 – Força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 2: valores individuais, valores médios, desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).	290
Tabela B.13 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 3 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).	293
Tabela B.14 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 3 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).	295
Tabela B.15 – Força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 3: valores individuais, valores médios, desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).	297
Tabela B.16 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 3 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).	300
Tabela B.17 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 3 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).	302
Tabela B.18 – Valores individuais de força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 4.	302

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.1	Objetivos.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Definição, aplicações e vantagens dos painéis sanduíche.....	6
2.2	Requisitos estruturais.....	8
2.2.1	Ação compósita	8
2.2.2	Painéis sanduíche estruturais e não estruturais.....	12
2.3	Componentes.....	13
2.3.1	Camadas de concreto.....	13
2.3.2	Armaduras	14
2.3.3	Núcleo isolante	15
2.3.4	Conectores	16
2.3.5	Conectores PERFOFRP	24
2.4	Avaliação de desempenho dos painéis sanduíche	33
2.4.1	Ensaio de cisalhamento.....	34
2.4.2	Ensaio de compressão	37
2.4.3	Ensaio de flexão.....	38
2.4.4	Ensaio de flexo-compressão	41
2.4.5	Ensaio de longa duração	42
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	44
3.1	Confecção dos conectores	44
3.2	Ensaio <i>push-out</i>	47
3.2.1	Montagem dos corpos de prova.....	47
3.2.2	Execução dos ensaios	51
3.3	Caracterização dos materiais	52
3.4	Planejamento experimental.....	52
3.4.1	Série 1	52
3.4.2	Série 2.....	55
3.4.3	Série 3.....	58
3.4.4	Série 4.....	59
3.5	Processamento dos dados.....	61
3.5.1	Padrões de fissuração	61

3.5.2	Carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo.....	62
3.5.3	Parâmetros mecânicos	63
3.5.4	Avaliação da ductilidade	64
3.5.5	Análise estatística	65
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	68
4.1	Caracterização dos materiais	68
4.1.1	Concreto	69
4.1.2	GFRP	69
4.1.3	Aço (armaduras ou vergalhões).....	71
4.2	Série 1: avaliação do efeito da disposição dos furos no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	72
4.2.1	Padrões de fissuração	73
4.2.2	Carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo.....	88
4.2.3	Parâmetros mecânicos	95
4.3	Série 2: avaliação do efeito dos mecanismos resistentes no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	134
4.3.1	Padrões de fissuração	135
4.3.2	Carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo.....	140
4.3.3	Parâmetros mecânicos	145
4.3.4	Avaliação da ductilidade	158
4.4	Série 3: avaliação do efeito da espessura do reforço em FRP na região entre as camadas de concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	161
4.4.1	Padrões de fissuração	162
4.4.2	Carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo.....	166
4.4.3	Parâmetros mecânicos	170
4.4.4	Avaliação da ductilidade	179
4.5	Série 4: avaliação do efeito do número e do diâmetro dos furos na região de ancoragem em concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	181
4.5.1	Padrões de fissuração	182
4.5.2	Carregamento <i>versus</i> deslizamento relativo.....	185
4.5.3	Parâmetros mecânicos	189
4.5.4	Avaliação da ductilidade	198

5	PROPOSTA DE UM MODELO ANALÍTICO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE CONEXÕES PERFOFRP SOB ESFORÇOS DE CISALHAMENTO	201
5.1	Ruptura no concreto nos furos	202
5.2	Ruptura no GFRP	203
5.2.1	GFRP na região entre camadas de concreto	204
5.2.2	Região de GFRP confinado	208
5.2.3	Ruptura por perda de aderência	210
5.2.4	Enrijecimento da região exposta	212
5.3	Otimização do conector	214
6	CONCLUSÕES	215
6.1	Série 1: avaliação do efeito da disposição dos furos no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	215
6.2	Série 2: avaliação do efeito dos mecanismos resistentes no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	216
6.3	Série 3: avaliação do efeito da espessura do reforço em PRFV na região entre as camadas de concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	217
6.4	Série 4: avaliação do efeito do número e do diâmetro dos furos na região de ancoragem em concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP	218
6.5	Proposta de um modelo analítico da capacidade resistente de conexões PERFOFRP	220
6.6	Sugestões para trabalhos futuros	221
7	BIBLIOGRAFIA	223
	APÊNDICE A: RESULTADOS COMPLETOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	235
	Concreto	235
	GFRP	236
	Aço	240
	APÊNDICE B: PARÂMETROS MECÂNICOS COMPLEMENTARES	243
	Série 1	245
	Coeficiente de rigidez elástico	245
	Coeficiente de rigidez inelástico	258

Força no limite do regime elástico, deslizamento no limite do regime elástico, acréscimo de força no regime inelástico e acréscimo de deslizamento no regime inelástico	268
Série 2	284
Coeficiente de rigidez elástico.....	284
Coeficiente de rigidez inelástico.....	287
Capacidade de carga no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de carga no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico	288
Série 3	291
Coeficiente de rigidez elástico.....	291
Coeficiente de rigidez inelástico.....	294
Capacidade de carga no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de carga no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico	295
Série 4	298
Coeficiente de rigidez elástico.....	298
Coeficiente de rigidez inelástico.....	301
Capacidade de força no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de força no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico.....	302
Conclusões	303
APÊNDICE C: GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS COMPLEMENTARES	305
Série 1	305
Série 2	311
Série 3	315
Série 4	319

1 INTRODUÇÃO

Os painéis pré-moldados de concreto com isolamento incorporado, conhecidos como painéis sanduíche, são elementos construtivos formados por duas camadas de concreto que envolvem um núcleo de material isolante. Essa configuração visa oferecer um desempenho térmico mais eficiente para a edificação em comparação com outros sistemas construtivos, como alvenaria e paredes de concreto.

Para garantir a integridade estrutural durante as etapas de içamento, transporte e ao longo da vida útil da edificação, são utilizados conectores (cimentícios, metálicos ou poliméricos) que atravessam a camada de material isolante e se ancoram nas camadas externas de concreto. Essas camadas são geralmente compostas por concreto armado ou protendido, enquanto o núcleo interno é formado por chapas de poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene*, EPS) ou extrudado (*Extruded Polystyrene*, XPS).

Os painéis sanduíche podem ter função estrutural (*loadbearing panels*) ou podem ser utilizados simplesmente como elementos de fechamento ou divisórias internas (*non-loadbearing panels*). Podem ser aplicados tanto na parte externa, que é a utilização mais comum, quanto no interior das edificações. Quando possuem função estrutural, podem ser dimensionados como vigas (*beams*), vigas-parede (*bearing walls*) ou pilares-parede (*shear walls*), em combinação com diferentes sistemas estruturais, como concreto armado, concreto protendido ou estruturas metálicas. Além disso, o acionamento mecânico das camadas de concreto pode resultar em um comportamento conjunto ou independente, influenciado pela rigidez, resistência e disposição dos conectores ao longo do painel. Esses fatores determinam os modos de comportamento do painel (PCI COMMITTEE REPORT, 2011), que incluem:

- a) comportamento não compósito, onde cada camada de concreto atua de forma independente;
- b) comportamento compósito, no qual as camadas de concreto trabalham em conjunto para resistir aos esforços solicitantes; e
- c) comportamento parcialmente compósito, que representa um intermediário entre os dois comportamentos anteriores.

De acordo com o *Precast Concrete Institute (PCI) Committee Report* (2011), os painéis sanduíche são amplamente utilizados em diversos tipos de estruturas, como edifícios residenciais, comerciais e industriais; escolas; ambientes de temperatura controlada; depósitos; prédios públicos; e hospitais, entre outros. Esses painéis oferecem várias vantagens, conforme destacado pelo relatório, incluindo durabilidade, economia, resistência ao fogo, capacidade de

vencer grandes vãos, alto desempenho energético, proteção eficaz contra umidade e resistência a impactos, furtos e vandalismo.

1.1 Motivação

A tecnologia dos painéis sanduíche busca maximizar a eficiência energética das edificações, assim uma das principais preocupações relacionadas a esse sistema é a eliminação das pontes térmicas causadas por conectores fabricados com materiais metálicos ou cimentícios. Estudos demonstraram que o uso de concreto e aço para conectar duas camadas de concreto pode resultar em pontes térmicas substanciais, reduzindo a resistência térmica do painel em até 41%, quando conectores de aço inoxidável representam 0,1% da área da seção transversal em relação à área da superfície do painel; e em até 37% quando conectores de concreto ocupam 1,0 % da área da seção transversal em relação à superfície do painel (EINEA *et al.*, 1991; MACCALL, 1985). Para mitigar esse problema, foram introduzidos conectores de Polímero Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) ou, do termo em inglês *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP), que apresentam baixa condutividade térmica, equivalente a aproximadamente 1,7 % da condutividade do aço inoxidável e 14 % da do concreto (MUGAHED AMRAN *et al.*, 2020).

Uma das soluções desenvolvidas consiste no emprego dos conectores constituídos por GFRP, em formato de chapa plana e perfurada, constituídos por mantas do tipo *Chopped Strand Mat* (CSM) e resina poliéster, denominado PERFOFRP, que provém do termo em inglês *Perforated Fiber Reinforced Polymer* (LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; AZENHA; *et al.*, 2013a, b; LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; *et al.*, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; VALENTE; *et al.*, 2013; LAMEIRAS, RODRIGO *et al.*, 2021; LAMEIRAS, RODRIGO; VALENTE; BARROS; AZENHA; GONÇALVES, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO DE MELO, 2015). Essas chapas são confeccionadas com um determinado número de furos por onde o concreto passa criando pontos de ancoragem, que promovem resistência ao cisalhamento e à separação das paredes de concreto. Além disso, os conectores PERFOFRP apresentam algumas vantagens, em relação aos demais conectores poliméricos: (a) podem ser facilmente padronizados para produção em massa ou customizados para uma determinada aplicação; (b) não necessitam de grandes plantas industriais para serem fabricados, assim como não exigem grande investimento em maquinário para serem produzidos.

Os conectores PERFOFRP foram desenvolvidos por Lameiras (2015), que comprovou sua viabilidade de aplicação ao investigar a influência de diferentes mecanismos resistentes na capacidade última do conector, considerando a ruptura na região de GFRP

ancorada no concreto (ver Figura 2.6). Posteriormente, Huang e Dai (2019) e Silva (2020) aprofundaram a análise, avaliando o comportamento dos conectores quando a ruptura é induzida na região exposta do GFRP, em contato com o material isolante. Essas pesquisas permitiram a obtenção de conclusões relevantes sobre o comportamento geral dos conectores sob diferentes condições de acionamento mecânico:

- a) assim como nos conectores PERFOBOND, verificou-se que a distância dos furos em relação às bordas e a distância entre furos exerce influência significativa no desempenho da conexão;
- b) diferentemente dos conectores PERFOBOND, observou-se que, a depender do material compósito empregado, há a possibilidade de ruptura do próprio conector, tanto na região embebida no concreto, nas proximidades dos furos, quanto na região livre, situada entre as camadas de concreto;
- c) a presença do concreto à frente do conector demonstrou exercer papel relevante na resistência global da conexão, evidenciando a importância da aderência nesse mecanismo resistente.

Os conectores PERFOBOND foram originalmente desenvolvidos para ligações aço-concreto e consistem em chapas metálicas perfuradas com furos circulares, destinadas a promover a transferência de esforços de cisalhamento por meio da ancoragem do concreto nos furos e da interação por aderência e atrito na interface. Esse tipo de conector se consolidou na literatura como uma solução eficiente e de comportamento bem compreendido. Inspirado nesse conceito, os estudos mencionados se propuseram a estudar os conectores PERFOFRP, que mantêm a lógica estrutural dos PERFOBOND, mas substituem o aço por chapas de PRFV perfuradas, buscando avaliar a viabilidade do uso de materiais compósitos como alternativa mais leve e menos condutiva termicamente para painéis sanduíche.

Apesar dos avanços alcançados, o conhecimento sobre os conectores PERFOFRP ainda se encontra em fase de consolidação. Estudos anteriores já contribuíram de forma relevante para essa evolução. Foram realizadas investigações sobre o comportamento dos conectores ao *pull-out* (LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; *et al.*, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO; VALENTE; BARROS; AZENHA; GONÇALVES, 2018), inclusive com a proposição de modelo analítico para previsão da capacidade de resistência ao arrancamento. Também foram conduzidos estudos preliminares sobre o comportamento ao cisalhamento por meio de ensaios *push-out*, nos quais foram analisadas variáveis geométricas e de configuração, permitindo identificar tendências importantes no mecanismo resistente (LAMEIRAS, RODRIGO DE MELO, 2015). Além disso, foram avaliadas a influência da posição e do

espaçamento dos furos na ruptura dos conectores na zona livre, entre camadas de concreto, como apresentado na dissertação de Silva (2020).

Mesmo com essas contribuições, os dados experimentais disponíveis ainda são limitados e não abrangem toda a complexidade mecânica envolvida. Permanece, portanto, a necessidade de explorar de maneira mais ampla os diferentes mecanismos resistentes que atuam nesses conectores, de modo a viabilizar a proposição de modelos de dimensionamento aplicáveis a situações usuais de projeto.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é aprofundar o conhecimento a respeito do comportamento ao cisalhamento de ligações formadas por conectores PERFOFRP e concreto, empregados de forma contínua, com foco na investigação dos mecanismos resistentes associados à ruptura do conector na zona embebida no concreto, nas proximidades dos furos. A análise foi fundamentada em dados obtidos por meio de ensaios de cisalhamento duplo (*push-out tests*), realizados em modelos experimentais representativos de painéis sanduíche. Os objetivos específicos definidos para esta pesquisa são os seguintes:

- a) analisar os efeitos da variação do espaçamento entre os furos no comportamento força–deslocamento e nos parâmetros mecânicos de conectores PERFOFRP submetidos ao cisalhamento;
- b) avaliar os impactos da variação da distância entre os furos e a borda no comportamento força–deslocamento e nos parâmetros mecânicos de conectores PERFOFRP sob cisalhamento;
- c) verificar a influência da variação do diâmetro dos furos no comportamento força–deslocamento e nos parâmetros mecânicos de conectores PERFOFRP submetidos ao cisalhamento;
- d) analisar a influência da variação da espessura do reforço em PRFV, localizado na região entre as camadas de concreto, no comportamento força–deslocamento e nos parâmetros mecânicos de conectores PERFOFRP submetidos ao cisalhamento.
- e) investigar os mecanismos resistentes dos conectores PERFOFRP, por meio de modificações artificiais em suas características, quando submetidos a esforços de cisalhamento;
- f) propor um modelo de previsão da resistência das conexões formadas por conectores PERFOFRP, considerando as possíveis rupturas na região de

GFRP entre camadas de concreto, na região de GFRP ancorado, nos pontos de ancoragem de concreto e na interface GFRP–concreto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada neste Capítulo 2 tem como objetivo explorar os principais conceitos, materiais e metodologias relacionados ao comportamento mecânico de painéis sanduíches e seus conectores. Esse sistema construtivo tem ganhado destaque em projetos arquitetônicos e estruturais devido à sua eficiência térmica, durabilidade e produtividade na execução. Diversos estudos foram realizados ao longo das últimas décadas para investigar as propriedades dos materiais utilizados, as configurações dos conectores e a interação entre os elementos estruturais. A seguir, são apresentados aspectos introdutórios, requisitos estruturais e uma descrição dos componentes essenciais envolvidos no sistema, visando uma compreensão completa do tema.

2.1 Definição, aplicações e vantagens dos painéis sanduíche

Os painéis sanduíche (Figura 2.1) são elementos construtivos compostos por duas camadas externas de concreto, com um material isolante, como o EPS (poliestireno expandido) ou o XPS (poliestireno extrudido), posicionado no centro. Para assegurar a integração entre as camadas de concreto e o material isolante, utilizam-se conectores, que podem ser cimentícios, metálicos ou fabricados com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Os painéis sanduíche podem ser produzidos em uma ampla gama de tamanhos, alcançando dimensões de até 23,0 m de comprimento e 4,6 m de largura. O tamanho máximo desses painéis é geralmente limitado por fatores como restrições de transporte e a capacidade dos equipamentos de produção (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

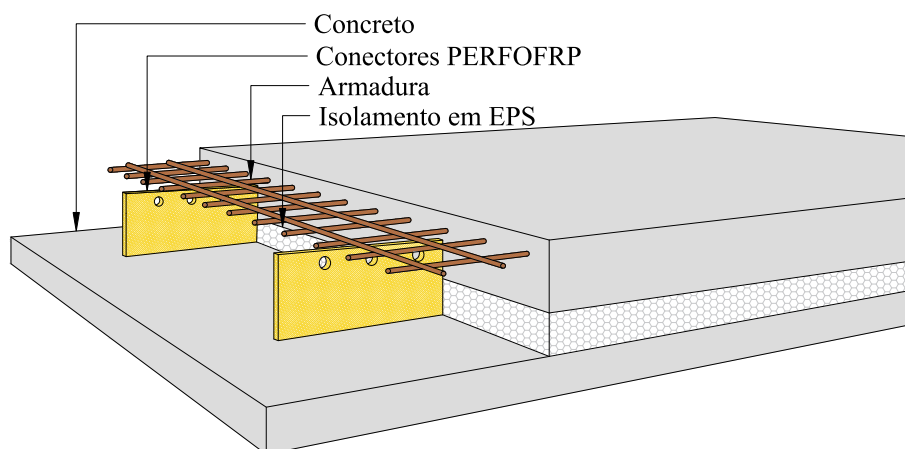


Figura 2.1 – Estrutura de um painel sanduíche destacando os componentes principais, incluindo conectores PERFOFRP.

Desenvolvidos na década de 1950 para superar as limitações de isolamento térmico dos painéis de concreto pré-moldado maciços (FARIA OLIVEIRA *et al.*, 2022), os painéis sanduíche continuam a ser amplamente utilizados devido às suas vantagens em relação a outros sistemas construtivos. Esses painéis oferecem uma combinação de eficiência estrutural e térmica, além de possibilitar a fabricação em ambientes controlados, o que reduz atrasos no canteiro de obras e otimiza a mão de obra envolvida (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). A Figura 2.2 ilustra as etapas construtivas de uma obra realizada com a utilização de painéis sanduíche.



Figura 2.2 – Processo construtivo da obra *Saginaw Gardens Apartment*, no Canadá: (a) operários trabalhando sobre um pavimento; (b) içamento de um painel sanduíche; (c) montagem das paredes da fachada de um pavimento; (d) içamento de um elemento pré-moldado; (e) finalização do último

pavimento; e (f) edificação concluída (CANADIAN PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE, 2015).

Os painéis sanduíche são amplamente empregados tanto como vedação externa quanto como elementos estruturais em edifícios institucionais, comerciais, industriais e residenciais (EINEA *et al.*, 1991), entre outras aplicações. Além disso, oferecem diversos benefícios: as camadas externas de concreto asseguram proteção contra danos mecânicos, intempéries e umidade (PCI COMMITTEE REPORT, 2011), enquanto a camada interna de material isolante proporciona isolamento térmico e acústico (O'HEGARTY *et al.*, 2020).

A eficiência térmica dos painéis sanduíche pré-fabricados contribui para a redução dos custos de aquecimento e resfriamento dos edifícios, tornando-os mais vantajosos em comparação com sistemas tradicionais, como alvenaria e paredes de concreto maciço (AL-HOMOUD, 2005). Além disso, os painéis podem ser removidos, se necessário, para facilitar a expansão ou realocação da edificação (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). Outra vantagem importante é a possibilidade de moldagem dos painéis em diferentes configurações arquitetônicas, eliminando a necessidade de acabamentos adicionais na fachada após sua instalação (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

2.2 Requisitos estruturais

O manual do PCI (2011) apresenta diretrizes detalhadas para o projeto de painéis sanduíche. Em situações nas quais as especificidades dos painéis sanduíche não são diretamente abordadas, recomenda-se a aplicação de disposições de projeto destinadas a paredes de concreto armado maciças. Essas disposições são estendidas para painéis sanduíche, partindo da premissa de que o comportamento à flexão desses elementos pode ser tratado de maneira análoga, considerando-se uma rigidez equivalente à de uma seção de concreto armado contínua (BENAYOUNE *et al.*, 2007). Essa abordagem é especialmente válida quando o painel possui um elevado grau de ação compósita entre as camadas de concreto, o que justifica a adoção de metodologias de projeto utilizadas para estruturas maciças.

2.2.1 Ação compósita

Os painéis sanduíche podem ser projetados para apresentar comportamentos não compósitos, parcialmente compósitos ou totalmente compósitos, conforme ilustrado na Figura 2.3. Esse comportamento depende da forma como as camadas externas de concreto são dispostas e conectadas. Quando as faces são ligadas por elementos que não conseguem

transferir as tensões de cisalhamento, o painel é classificado como não compósito. Nos painéis totalmente compósitos, as camadas externas são conectadas de maneira a resistir conjuntamente às forças de flexão, assegurando a completa transferência das tensões de cisalhamento entre as camadas. O comportamento parcialmente compósito, por sua vez, caracteriza-se por uma condição intermediária, em que apenas parte do cisalhamento é transferida entre as camadas (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

O grau de ação compósita é fortemente influenciado pela natureza das conexões entre as duas camadas de concreto, especialmente pelo tipo e pela disposição dos conectores. Projetar para uma ação compósita parcial ou total pode aumentar significativamente a eficiência estrutural, em comparação com um painel totalmente não compósito (RIZKALLA; HASSAN; LUCIER, 2009).

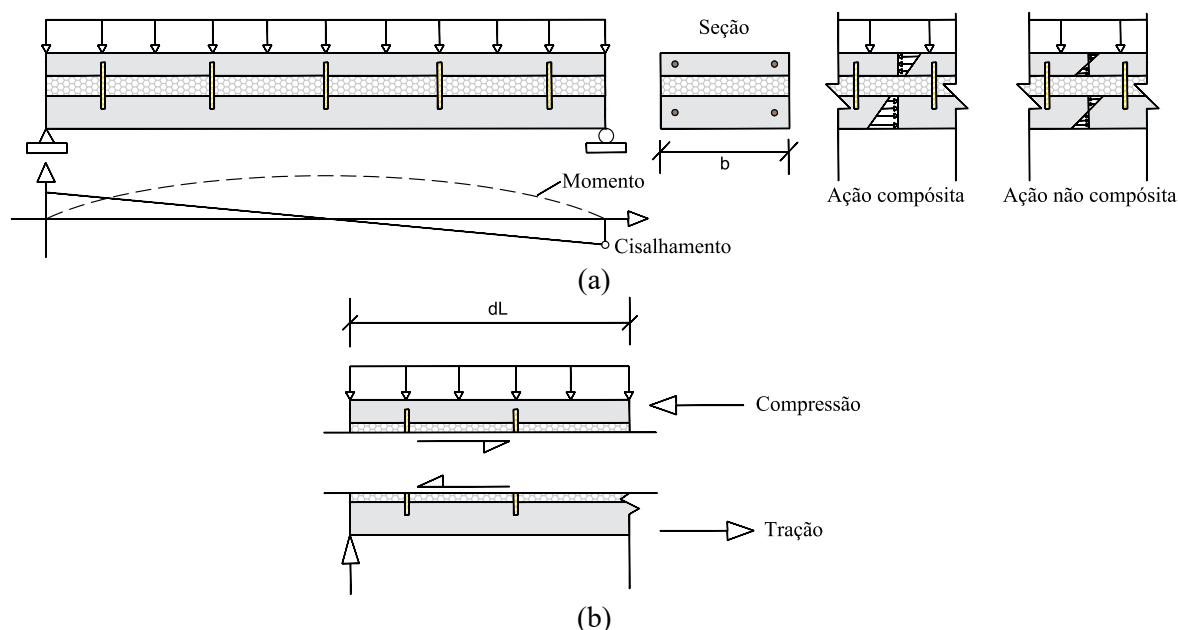


Figura 2.3 – Representação de painéis sanduíche com conectores em formato de barras, adaptado de Naito *et al.* (2012): (a) ação compósita após a aplicação de força; e (b) desenvolvimento de tensões de cisalhamento entre as camadas de concreto.

O comportamento de painéis totalmente compósitos e não compósitos pode ser prontamente estimado por meio dos códigos de projeto de concreto armado. Contudo, a previsão do desempenho de painéis parcialmente compósitos é consideravelmente mais complexa, exigindo, em grande parte, dados provenientes de ensaios experimentais e modelagem computacional avançada (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

O método típico de projeto para painéis sanduíche, proposto pelo PCI, considera um comportamento não compósito (PCI COMMITTEE REPORT, 2011). Contudo, testes práticos têm demonstrado que a maioria dos painéis costumam apresentar um comportamento

parcialmente compósito, conseguindo transferir certo nível de cisalhamento entre as camadas de concreto (BUSH; STINE, 1994; LEE; PESSIKI, 2008b; PESSIKI; MLYNARCZYK, 2003; RIZKALLA; HASSAN; LUCIER, 2009).

Conforme mencionado, o grau de ação compósita é geralmente quantificado por meio de testes experimentais, embora alguns métodos analíticos também tenham sido desenvolvidos (GOMBEDA *et al.*, 2017). Painéis sanduíche com comportamento compósito podem alcançar até 100% de ação compósita na flexão (PAN *et al.*, 2022) e aproximadamente 80% a 90% de ação compósita na compressão, quando comparados a painéis maciços (HAMED; NEGRU; YALDA, 2022; HUANG, QIAN; HAMED; GILBERT, 2020a).

Os painéis totalmente compósitos apresentam, na prática, uma elevada resistência ao cisalhamento através da camada de isolamento, o que permite que as camadas de concreto trabalhem de forma integrada, resultando em um sistema com um único eixo neutro. Estruturalmente, esses painéis são mais eficientes do que os não compósitos, pois podem ser fabricados com menor quantidade de material, mantendo a rigidez e resistência necessárias. Contudo, essa eficiência traz desafios, como a necessidade de um maior número de conectores de cisalhamento, o que pode aumentar os custos. Além disso, a grande quantidade de conectores pode reduzir a capacidade de isolamento e induzir a deformação térmica (*thermal bowing*), um problema especialmente relevante em painéis mais extensos (BUSH; STINE, 1994; EINEA *et al.*, 1991; PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

A deformação térmica ocorre porque a camada de concreto no interior da edificação permanece próxima à temperatura ambiente cotidiana, enquanto a camada externa é influenciada pelas variações de temperatura e exposição solar. A diferença térmica entre as camadas induz deformações que causam uma curvatura, mantendo a compatibilidade de deformação do painel. Em dias quentes, os painéis tendem a arquear para fora, e o oposto ocorre em temperaturas mais baixas. Esse arqueamento térmico gera deflexões indesejadas e aumenta as tensões nas camadas de concreto e nas conexões. Além disso, o arqueamento pode ser resultado de outros fatores, como o protendimento excêntrico, a fluência e a retração (PCI COMMITTEE REPORT, 1997). O protendimento excêntrico ocorre quando a força de protensão não é aplicada ao longo do eixo central do elemento estrutural, gerando um momento fletor adicional. Essa excentricidade na aplicação da força provoca deformações fora do plano, contribuindo para o arqueamento do painel.

Tittelboom *et al.* (2015) observaram que o arqueamento térmico torna comum a formação de fissuras na camada de concreto na fachada de grandes painéis sanduíche, especialmente durante o verão. Por conta disso, alguns projetistas preferem utilizar painéis não

compósitos, apesar de sua menor rigidez e capacidade de força em comparação aos painéis totalmente compósitos.

Painéis parcialmente compósitos representam uma condição intermediária entre os totalmente compósitos e os não compósitos. Na prática, a maioria dos painéis que não utilizam grandes conectores de concreto (regiões sólidas de concreto ligando as duas camadas ou conectores de aço) exibe algum grau de ação compósita. Assim como ocorre nos painéis não compósitos, cada camada possui seu próprio eixo neutro, e a deformação por cisalhamento se distribui ao longo do painel. Prever com exatidão o comportamento desses painéis é desafiador, pois requer a consideração simultânea das deformações por flexão e por cisalhamento do material isolante. Essas formas de deformação são significativamente influenciadas pelo nível de transferência de cisalhamento proporcionado pelos conectores, bem como pela aderência e pelo atrito entre o isolante térmico e o concreto (BUSH; STINE, 1994; PCI COMMITTEE REPORT, 2011; SALMON, DAVID C.; EINEA, 1995).

A avaliação da ação compósita em painéis sanduíche é objeto de discussão, e não há consenso sobre a abordagem mais eficaz. Os métodos mais empregados se baseiam na resistência ao momento último do painel (Equação 2.1) conforme recomendado pelo *PCI Committee Report* (1997), ou na análise da rigidez sob forças de serviço (Equação 2.2) conforme proposto por Pessiki e Mlynarczyk (2003). Em síntese, o percentual de ação compósita é determinado com base em resultados de ensaios experimentais e na experiência prática acumulada (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

$$k_u = \frac{M_{u,test} - M_{u,NC}}{M_{u,FC} - M_{u,NC}} \cdot 100 \quad 2.1$$

$$k_{EI} = \frac{EI_{test} - EI_{NC}}{EI_{FC} - EI_{NC}} \cdot 100 \quad 2.2$$

Nessa abordagem, k_u e k_{EI} representam os percentuais de ação compósita em termos de resistência e rigidez, respectivamente. M_u é o momento último do painel, enquanto EI corresponde à rigidez à flexão do painel. Os componentes rotulados como *NC* referem-se ao painel teoricamente não compósito, *FC* indicam um painel totalmente compósito, e *test* refere-se aos resultados experimentais obtidos.

Conectores de cisalhamento que garantem comportamento totalmente compósito em termos de resistência nem sempre proporcionam o mesmo efeito em relação à rigidez e o contrário também ocorre. Por isso, recomenda-se avaliar a ação compósita considerando tanto

a resistência quanto a rigidez. Alternativamente, pode-se utilizar uma abordagem que analise essa ação ao longo da vida útil da estrutura, como o Método de Curvatura (HASSAN; RIZKALLA, 2010) ou por meio de medições relativas de deslizamento entre as camadas de concreto (NAITO *et al.*, 2012).

2.2.2 Painéis sanduíche estruturais e não estruturais

Os painéis sanduíche podem ser projetados para funções estruturais ou não estruturais, dependendo de sua aplicação (ver Figura 2.4). Quando dimensionados para suportar cargas de pisos ou paredes, são classificados como estruturais (FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, 2017). Nessa configuração, desempenham um papel crucial no sistema estrutural da edificação, transferindo as forças verticais diretamente para a fundação. Em contraste, os painéis sanduíche não estruturais não têm a função de sustentar cargas de outros elementos do edifício, o que permite uma espessura menor em comparação aos painéis estruturais. Nesse caso, são normalmente apoiados em cada pavimento, com suportes localizados nas extremidades superior ou inferior, que transferem o peso próprio do painel à estrutura principal do edifício. Além disso, uma restrição na extremidade oposta assegura sua estabilidade, permitindo que funcionem como painéis simplesmente apoiados (O’HEGARTY; KINNANE, 2020).

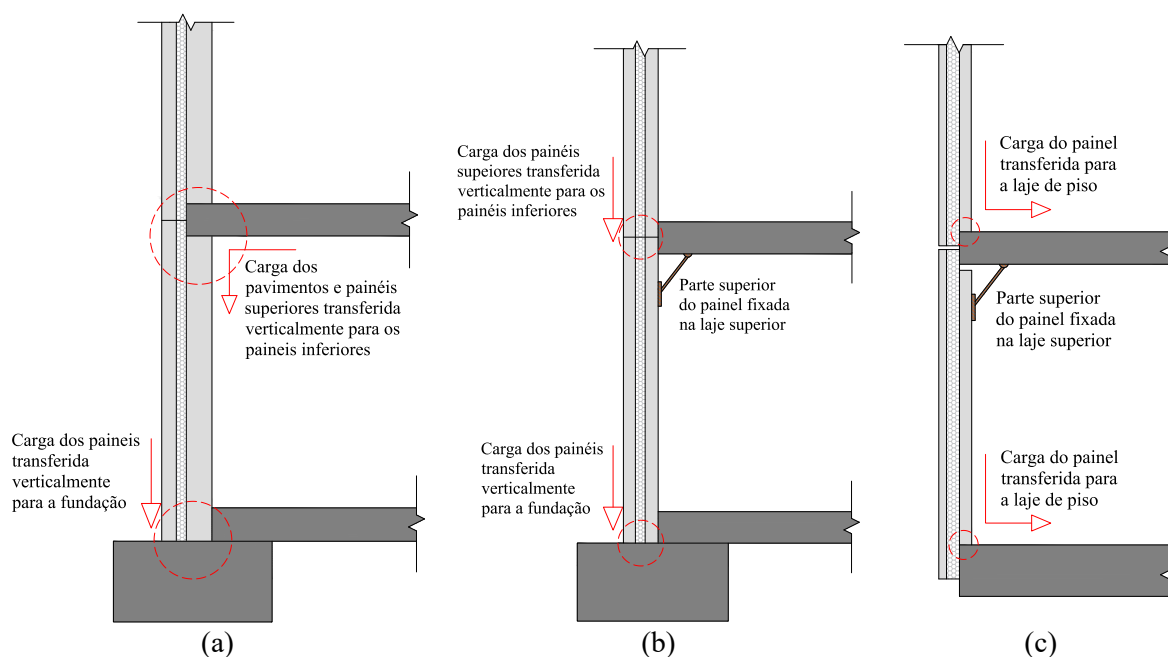


Figura 2.4 – Exemplos de painéis sanduíche, adaptado de O’Hegarty e Kinnane (2020): (a) autoportantes suportando painéis e lajes dos pavimentos superiores; (b) autoportantes suportando apenas os painéis; e (c) não autoportantes suportando apenas o próprio peso.

2.3 Componentes

O tópico “2.3” apresenta uma descrição detalhada dos principais elementos que constituem os painéis sanduíche, incluindo as camadas de concreto (também chamadas de faces), as armaduras, o núcleo isolante (também chamada de camada de isolamento) e os conectores. Cada componente é abordado individualmente, com uma análise de suas propriedades e das funções que desempenha na performance e no comportamento estrutural dos painéis sanduíche.

2.3.1 Camadas de concreto

As faces dos painéis sanduíche são, normalmente, compostas por concreto armado ou protendido. A espessura e o material dessas camadas varia de acordo com sua função estrutural, exigências de cobrimento, necessidade de ancoragem para os conectores e especificações de acabamento superficial (EINEA *et al.*, 1991). As camadas de concreto são projetadas, preferencialmente, para serem o mais finas possível, com a espessura mínima, normalmente, limitada a cerca de 50 mm, devido às exigências de cobrimento e de resistência ao fogo (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

A camada de concreto no exterior da edificação apresenta, geralmente, espessura entre 50 e 75 mm e pode receber tratamento arquitetônico. Além de proteger a camada de isolamento contra danos, essa camada pode contribuir para a resistência estrutural do painel, dependendo do tipo de conectores de cisalhamento utilizados (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

Já a camada de concreto voltada para o interior da edificação apresenta, usualmente, uma espessura variável entre 50 e 150 mm, conforme requisitos estruturais e nível de comportamento compósito desejado (PCI COMMITTEE REPORT, 1997). Em projetos não compósitos, essa camada tende a ser mais espessa do que a camada arquitetônica, pois é responsável por suportar todas as forças estruturais do sistema (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

Quanto ao formato da seção transversal, as seções retangulares são as mais utilizadas, embora outras configurações, como núcleos vazados, seções nervuradas e onduladas, também tenham sido propostas (PALERMO *et al.*, 2014; PCI COMMITTEE REPORT, 2011; RICCI *et al.*, 2013). A configuração padrão geralmente envolve duas camadas de concreto; no entanto, uma solução com três camadas já foi apresentada como alternativa (LEE; PESSIKI, 2006).

Para ampliar a aplicabilidade dos painéis, pesquisas recentes têm focado no desenvolvimento de seções mais finas, com o objetivo de reduzir tanto o peso quanto a espessura dos elementos (LAMEIRAS, RODRIGO DE MELO, 2015; WILLIAMS PORTAL *et al.*, 2017). Além disso, para aprimorar a eficiência energética dos painéis, foram introduzidos modelos com sistemas de aquecimento solar integrados à camada arquitetônica, criando uma superfície termicamente ativa por meio de tubulações embutidas (O’HEGARTY; KINNANE; MCCORMACK, 2017a, b).

Com os avanços na tecnologia dos materiais, alternativas sustentáveis de concreto, como o geopolimérico (KUMAR *et al.*, 2021, 2022) e o concreto com agregados reciclados (XIE *et al.*, 2022) têm sido estudadas para a produção de painéis com menor impacto ambiental. Além disso, o emprego de concreto de alta resistência (HUANG, QIAN; HAMED; GILBERT, 2020b) e de concreto de ultra-alto desempenho (*Ultra High Performance Concrete*, UHPC) (DING *et al.*, 2022) tem sido investigado para aumentar a resistência estrutural e, simultaneamente, reduzir a espessura e o peso dos painéis.

2.3.2 Armaduras

As camadas de concreto geralmente são reforçadas com telas de aço soldado, apresentando taxas de armadura mínimas ou ligeiramente superiores às exigidas para o controle de retração e fissuração. O dimensionamento à flexão, exceto em casos de forças axiais elevadas e/ou excêntricas, é frequentemente ditado pelas forças aplicadas durante o transporte e manuseio, que tendem a ser mais significativas do que aquelas geradas pela ação do vento (BUSH; WU, 1998). Em painéis de grandes dimensões, que ultrapassam a altura de um pavimento, a protensão é amplamente adotada para evitar fissurações durante a instalação (BUSH; WU, 1998; LEE; PESSIKI, 2008a; RIZKALLA; HASSAN; LUCIER, 2009).

O cobrimento das armaduras desempenha um papel fundamental, pois a corrosão do aço compromete a durabilidade dos painéis sanduíche e acarreta um aumento expressivo nos custos de manutenção (GARHWAL; SHARMA; ROY, 2022). Nesse contexto, a utilização de barras PRF destaca-se como uma solução eficaz para mitigar os problemas de corrosão (KUMAR *et al.*, 2021, 2022). Essa alternativa é especialmente relevante considerando que os painéis sanduíche são amplamente utilizados como envoltórios externos em edificações pré-fabricadas, ficando, assim, mais suscetíveis a condições ambientais adversas.

Além da substituição das armaduras de aço, o uso do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (*Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete*, SFRSCC) foi

sugerido como uma solução para os painéis sanduíche (LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; AZENHA, 2015; LAMEIRAS, RODRIGO DE MELO, 2015).

Em outra abordagem com o uso de SFRSCC, as camadas externas são interligadas por nervuras que substituem partes da camada de isolamento térmico. Essas nervuras desempenham um papel essencial na conexão das camadas de concreto, garantindo a integridade estrutural do sistema (BARROS; PEREIRA; SANTOS, 2007; PEREIRA; BARROS; CAMÕES, 2008).

2.3.3 Núcleo isolante

Os painéis sanduíche destacam-se por seu excelente desempenho térmico, proporcionado pela camada de isolamento entre as camadas de concreto. A espessura do núcleo isolante é determinada conforme as propriedades térmicas do material escolhido e a resistência térmica desejada para o painel, com valores variando, em geral, entre 25 e 100 mm (EINEA *et al.*, 1991). Além disso, os painéis costumam apresentar baixa permeabilidade, proporcionada justamente pelo material isolante que, deve ser, também, suficientemente robusto para suportar as pressões geradas durante o processo de concretagem (PCI COMMITTEE REPORT, 2011).

Embora existam muitos tipos de materiais isolantes disponíveis no mercado, os painéis sanduíche geralmente utilizam isolantes rígidos devido à sua compatibilidade com o concreto, que pode ser apontada em vários aspectos: absorção de umidade, estabilidade dimensional e coeficiente de expansão. Os dois materiais isolantes mais comumente utilizados são XPS e o EPS; embora outros materiais isolantes, como o poliuretano (*Polyurethane*, PU), o poliisocianurato (*Polyisocyanurate*, PIR) e os isolantes fenólicos (*Phenolic Foam*) também sejam frequentemente empregados (PCI COMMITTEE REPORT, 1997).

Há diversas semelhanças entre o EPS, o XPS e o PU. Todos esses materiais necessitam de cobertura adequada para garantir a resistência ao fogo no lado interno da edificação, assim como proteção contra as intempéries no lado externo (ambas as funções são atendidas pela colocação das camadas de concreto). O EPS é o material mais econômico e está disponível em blocos maiores, com dimensões de até 1,2 m × 1,2 m × 4,0 m. Já o PU e o XPS são comercialmente encontrados em placas que geralmente possuem 0,6 m de largura, 2,4 m de comprimento e espessuras variando entre 25 mm e 75 mm. O poliuretano oferece o maior valor de resistência térmica, embora o EPS e o XPS ainda apresentem um bom desempenho quando comparados a outros materiais de isolamento comuns (AL-HOMOUD, 2005).

Diversas pesquisas indicam que os isolamentos térmicos mais utilizados atualmente, o EPS e o XPS, contribuem significativamente para a capacidade de transferência

de cisalhamento dos painéis sanduíche. Essa contribuição é mais expressiva no EPS em comparação ao XPS, principalmente em função de sua textura superficial mais rugosa (BUSH; STINE, 1994; KIM; YOU, 2015; WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013). Entretanto, engenheiros projetistas costumam desconsiderar essa contribuição, partindo do pressuposto de que a aderência entre o isolamento e o concreto se rompe durante o transporte e a instalação, ou devido a mudanças volumétricas cíclicas ao longo da vida útil do painel (EINEA *et al.*, 1991; EKENEL, 2014).

2.3.4 Conectores

Conectores para painéis sanduíche são elementos estruturais que unem as camadas de concreto através do núcleo isolante, permitindo trabalharem de forma conjunta. Esses componentes transferem esforços, como os de cisalhamento e de tração, garantindo a integridade estrutural do painel e contribuindo para a rigidez e resistência do sistema. Podem ser fabricados em diferentes materiais, como concreto, aço e polímero reforçado com fibras (PRF), conhecido em inglês como *Fiber Reinforced Polymer* (FRP); ou por uma constituição compósita, que se refere à combinação de dois ou mais tipos de materiais em um mesmo conector (por exemplo, um conector de aço revestido de material polimérico). Além disso, são projetados para minimizar a transmissão de calor (pontes térmicas) entre as camadas de concreto. A configuração e o tipo de conector variam conforme o tipo de painel, o ambiente de aplicação e as forças estruturais previstas.

Além dos próprios conectores, o cisalhamento entre as camadas de concreto é igualmente transferido por regiões sólidas de concreto, intencionalmente introduzidas, e pela aderência entre o material de isolamento e o concreto. Essas regiões sólidas também são incorporadas aos painéis para permitir a fixação de dispositivos de içamento e de conexão entre painéis. Em certos projetos, se estendem por ambas as camadas de concreto, funcionando como conectores de cisalhamento adicionais, mas também criando pontes térmicas. Em painéis projetados para serem não compósitos, foi demonstrado que essas regiões contribuem mais para a resistência ao cisalhamento longitudinal do que os próprios conectores, o que exige cautela por parte dos projetistas, pois sua introdução pode alterar significativamente o comportamento estrutural do sistema (BUSH; STINE, 1994).

2.3.4.1 Classificações

Os conectores desempenham um papel importante tanto na determinação do grau de ação compósita quanto na manutenção do desempenho térmico e estrutural dos painéis

sanduíche. Diversas configurações de conectores são empregadas e cada tipo oferece diferentes níveis de eficiência na transferência de esforços e no comportamento compósito da estrutura (BENAYOUNE *et al.*, 2007; PCI COMMITTEE REPORT, 1997). Este tópico, “2.3.4.1 Classificações”, detalha as diversas categorias de conectores, analisando suas características estruturais, seus efeitos na ação compósita e como são aplicados tanto em painéis compósitos, assim como em painéis não compósitos.

2.3.4.1.1 Conectores compósitos e conectores não compósitos

Os conectores podem ser classificados em dois tipos principais: compósitos (também conhecidos por rígidos ou de cisalhamento) e não compósitos (também chamados de flexíveis ou não cisalhantes). Vale destacar que o termo "conectores de cisalhamento" muitas vezes é utilizado de forma genérica, abrangendo conectores de modo geral, independentemente de sua função ser de cisalhamento ou não. Ressalta-se, contudo, que o grau de ação compósita do painel pode ser influenciado não apenas pelo tipo de conector empregado, mas também pela quantidade de conectores utilizada.

Os conectores compósitos mantêm as faces de concreto unidas, permitindo que trabalhem de forma conjunta para suportar forças verticais e/ou laterais, promovendo uma ação, portanto, compósita nos painéis sanduíche (SAH *et al.*, 2024). Elevados graus de ação compósita são, normalmente, alcançados pelo uso de conectores constituídos por seções maciças de concreto; ou treliças de aço, sejam de aço carbono, galvanizado ou inoxidável (BENAYOUNE *et al.*, 2008; EINEA *et al.*, 1991; MAXIMOS *et al.*, 2007; PESSIKI; MLYNARCZYK, 2003). Essas soluções tendem a comprometer, contudo, o desempenho térmico dos painéis, uma vez que facilitam a transferência de calor por meio de pontes térmicas, ocasionando inclusive condensações nos ambientes internos (PCI COMMITTEE REPORT, 1997). Procurando superar essa limitação, conectores em formato de treliça, constituídos por GFRP (EINEA *et al.*, 1994; SALMON, DAVID *et al.*, 1997), e em formato de malha, constituídos por Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) (HASSAN; RIZKALLA, 2010), mostraram, por exemplo, serem eficazes em proporcionar elevados graus de ação compósita, sem induzir a criação de pontes térmicas (EINEA *et al.*, 1991).

Os conectores não compósitos, por seu turno, têm a função de evitar a separação das camadas de concreto, resistindo aos esforços provocados pelo peso próprio, transporte, ventos e sismos (SAH *et al.*, 2024), assim são utilizados em painéis que requerem níveis mínimos de ação compósita. Entre os materiais constituintes mais comuns estão o polipropileno, o viniléster e o aço, que é utilizado na fabricação de conectores em formato de

pino. Os conectores em formato de “U” e “C” também são bastantes empregados nessa categoria (PCI COMMITTEE REPORT, 1997). Esses conectores são, também, utilizados em painéis compósitos quando a distância entre os conectores de cisalhamento ultrapassa um limite aceitável, normalmente de 60 cm (EINEA *et al.*, 1991).

É importante destacar que a falha dos conectores não compósitos pode resultar no descolamento das camadas de concreto sem comprometer a função estrutural do edifício. Entretanto, tais falhas ainda representam um risco à segurança das pessoas próximas, especialmente em edificações de múltiplos andares. Por outro lado, a falha dos conectores compósitos pode impactar diretamente a capacidade de sustentação dos elementos estruturais, potencialmente levando ao colapso parcial, ou até total, da edificação (SAH *et al.*, 2024).

2.3.4.1.2 Conectores unidirecionais e conectores bidirecionais

Alguns conectores de cisalhamento apresentam rigidez em uma direção e flexibilidade em outra, sendo denominados conectores de cisalhamento unidirecionais. Exemplos desse tipo incluem barras dobradas, treliças e chapas perfuradas (ver Figura 2.5). Já os conectores de cisalhamento bidirecionais, que possuem capacidade semelhante em ambas as direções no plano do painel, incluem tubos cilíndricos e blocos de concreto, amplamente empregados em situações que requerem resistência uniforme em múltiplas direções (EINEA *et al.*, 1991).

A maioria dos conectores disponíveis no mercado é unidirecional, proporcionando resistência eficiente ao cisalhamento apenas na direção longitudinal (LOU *et al.*, 2022). Isso demanda um controle rigoroso durante a fabricação dos painéis para assegurar o alinhamento preciso desses conectores. Em contrapartida, conectores bidirecionais oferecem maior flexibilidade no processo de fabricação, pois garantem resistência uniforme ao cisalhamento em múltiplas direções. No entanto, sua aplicação em painéis sanduíche compósitos ainda não se popularizou amplamente devido ao aumento das pontes térmicas que podem causar (SYNDERGAARD *et al.*, 2022).

2.3.4.1.3 Conectores contínuos e conectores discretos

Conectores para painéis sanduíche podem ser, também, classificados como discretos ou contínuos. Os conectores discretos são elementos espaçados ao longo do painel, que conectam pontualmente por ancoragem as camadas de concreto, passando através do núcleo isolante. São estrategicamente posicionados para garantir a integridade estrutural sem comprometer o isolamento térmico. Já os conectores contínuos, por seu turno, estabelecem essa

mesma ligação continuamente ao longo de toda a extensão do painel, garantindo uma transferência de forças mais uniforme entre as camadas, tendendo a aumentar a rigidez geral do sistema. Esse tipo de conector, entretanto, pode intensificar a formação de pontes térmicas devido ao contato indireto, mas constante, proporcionado entre as camadas de concreto. A escolha entre conectores discretos ou contínuos depende dos requisitos térmicos e estruturais estabelecidos para o projeto (ver Figura 2.5).

Conectores de cisalhamento contínuos, como treliças de aço e malhas de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) ou, do termo em inglês *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), geram lacunas no isolamento, que precisam ser preenchidas com espuma *spray* de propriedades térmicas equivalentes às da camada isolante. Esse processo frequentemente representa um desafio durante a fabricação, pois o concreto pode infiltrar-se nos vazios da espuma, criando pontes térmicas indesejadas entre as camadas (O'HEGARTY *et al.*, 2021).

2.3.4.2 Materiais

Os conectores para painéis sanduíche podem ser fabricados com uma variedade de materiais, sendo os mais comuns: o concreto (em seções de concreto maciço), o aço e os FRPs, como GFRP, PRFC e PRFB (Polímero Reforçado com Fibras de Basalto). O PRFB também é conhecido pelo termo em inglês *Basalt Fiber Reinforced Polymer* (BFRP). A seguir, serão apresentados os diferentes tipos de conectores, categorizados conforme seu material de fabricação, com destaque para seus comportamentos e resultados em testes experimentais.

2.3.4.2.1 Conectores de aço

Nos anos 1990 e 2000, diversos pesquisadores investigaram os conectores de aço, destacando suas contribuições para o desempenho estrutural dos painéis (BENAYOUNE *et al.*, 2007, 2008; BUSH; STINE, 1994; BUSH; WU, 1998). Em estudo pioneiro, Bush e Stine (1994) compararam a eficiência de conectores treliçados com conectores formados por barras dobradas, realizando ensaios de cisalhamento com diferentes configurações para as camadas de concreto. Os resultados demonstraram que os conectores treliçados aumentaram a rigidez ao cisalhamento em até 70% em comparação aos conectores de barras dobradas, evidenciando a superioridade daquele em relação a este.

Embora os principais estudos tenham sido conduzidos no período anteriormente citado, nos anos 1990 e 2000, ainda há um interesse recente nos conectores de aço, como evidenciado pela pesquisa de Hou *et al.* (2019). Nesse estudo, foi desenvolvido um painel

sanduíche totalmente compósito, utilizando conectores de aço colocados de modo inclinado e distribuídos uniformemente ao longo do painel. O foco da pesquisa foi otimizar a eficiência estrutural, visando assegurar uma ação compósita total entre as camadas de concreto por meio da configuração mencionada.

Ainda com foco nos conectores de aço e na mitigação das pontes térmicas, Wang *et al.* (2022) desenvolveram conectores de cisalhamento compósitos, formados por aço revestido com GFRP, e analisaram a resistência à flexão de painéis sanduíche, que apresentaram comportamento não compósito. Em um estudo complementar, Yang *et al.* (2023) investigaram a resistência ao impacto de painéis sanduíche equipados com conectores compósitos de aço-GFRP, verificando que esses conectores apresentaram excelente aderência às camadas de concreto, resultando em um desempenho estrutural adequado aos fins propostos.

2.3.4.2.2 Conectores de FRP

Ainda na década de 1990, visando mitigar o problema das pontes térmicas, Salmon *et al.* (1997) demonstraram que painéis sanduíche equipados com conectores de barras dobradas de FRP apresentaram eficiência térmica 1,9 vezes superior à dos painéis com conexões realizadas por seções de concreto e 1,2 vezes superior à dos painéis com conectores de treliça de aço.

Embora os materiais de FRP possuam alta resistência à tração, a capacidade de resistência ao cisalhamento é baixa, o que, naquela época, gerava dúvidas sobre a viabilidade de sua utilização como conectores de cisalhamento, devido ao possível comprometimento da segurança estrutural. Entretanto, estudos posteriores, entre os anos 1990 e 2000, indicaram que a resistência ao cisalhamento dos conectores de FRP pode ser significativamente melhorada mediante a adoção de um posicionamento inclinado, o que permite a utilização otimizada de sua elevada resistência à tração por meio de um mecanismo de treliça (LIU *et al.*, 2022).

2.3.4.2.3 Conectores de GFRP

A partir dos anos 1990, em evolução aos estudos dos conectores fabricados em FRP, surgiu também o interesse nos conectores fabricados em GFRP, em diversos formatos, conforme pode ser observado na Figura 2.5, a seguir. Esse material era, já nessa época, amplamente reconhecido por sua elevada resistividade térmica. Isso ocorreu também na forma de um novo contraponto aos conectores de aço e aos conectores constituídos por regiões maciças de concreto.

Em virtude desse interesse, ainda na década de 1990, foi desenvolvido o primeiro conector de GFRP projetado para oferecer uma ação compósita expressiva, mantendo elevada a eficiência térmica do painel (EINEA *et al.*, 1994). Nesse estudo, foram investigadas diversas configurações, incluindo conectores em formato de "H" e conectores constituídos por barras diagonais ou dobradas. Após uma avaliação inicial, o conector em forma de barra dobrada foi selecionado para estudos mais detalhados, sendo testado tanto em corpos de prova de pequena escala (ensaios de cisalhamento puro e de flexão) quanto em escala real (ensaios de flexão). Os resultados demonstraram que o conector apresentou excelente capacidade resistente, promovendo elevado grau de ação compósita nos painéis analisados.

Nessa vertente, começaram a surgir no mercado conectores de cisalhamento não compósitos, fabricados a partir de materiais poliméricos sintéticos, com ou sem reforço de fibras, ampliando as opções para a construção de painéis sanduíche (EINEA *et al.*, 1991).

Nos anos 2000, Pantelides *et al.* (2008) concentraram-se no desenvolvimento de conectores bidirecionais e propuseram um modelo em formato de tubo cilíndrico, fabricado em GFRP. Os ensaios realizados evidenciaram que os painéis equipados com esse tipo de conector apresentaram capacidade de suportar forças fora do plano, além de assegurar a resistência ao cisalhamento entre as camadas de concreto.

Nos anos 2010, Kim e You (2015) e Choi *et al.* (2015) investigaram conectores de cisalhamento em formato de malha, fabricados em GFRP (ver Figura 2.5k), cujo comportamento estrutural se assemelhou ao de grades de CFRP estudadas anteriormente por outros pesquisadores (HODICKY *et al.*, 2015; RIZKALLA; HASSAN; LUCIER, 2009). Os estudos indicaram que, independentemente do material utilizado na fabricação dos conectores, o desempenho estrutural resultante foi caracterizado por uma ação parcialmente compósita.

Nos anos 2020, foram testados conectores comerciais do tipo IconX®, fabricados em GFRP, que demonstraram uma ação compósita eficaz tanto em flexão quanto em compressão (HAMED; NEGRU; YALDA, 2022). Em paralelo, Pan *et al.* (2022) e He *et al.* (2020) propuseram conectores de cisalhamento de GFRP nos formatos de "I" e "C", respectivamente, voltados para painéis sanduíche não compósitos, os quais apresentaram desempenho mecânico adequado, conforme avaliação dos pesquisadores. Em aplicações específicas, Chen *et al.* (2015) desenvolveram painéis sanduíche destinados a telhados e pisos, utilizando conectores de cisalhamento perfurados em formato de placa de GFRP, produzidos com laminados do tipo CSM. Os pesquisadores propuseram conectores tanto contínuos quanto discretos, ambos apresentando desempenho mecânico adequado para as aplicações propostas.

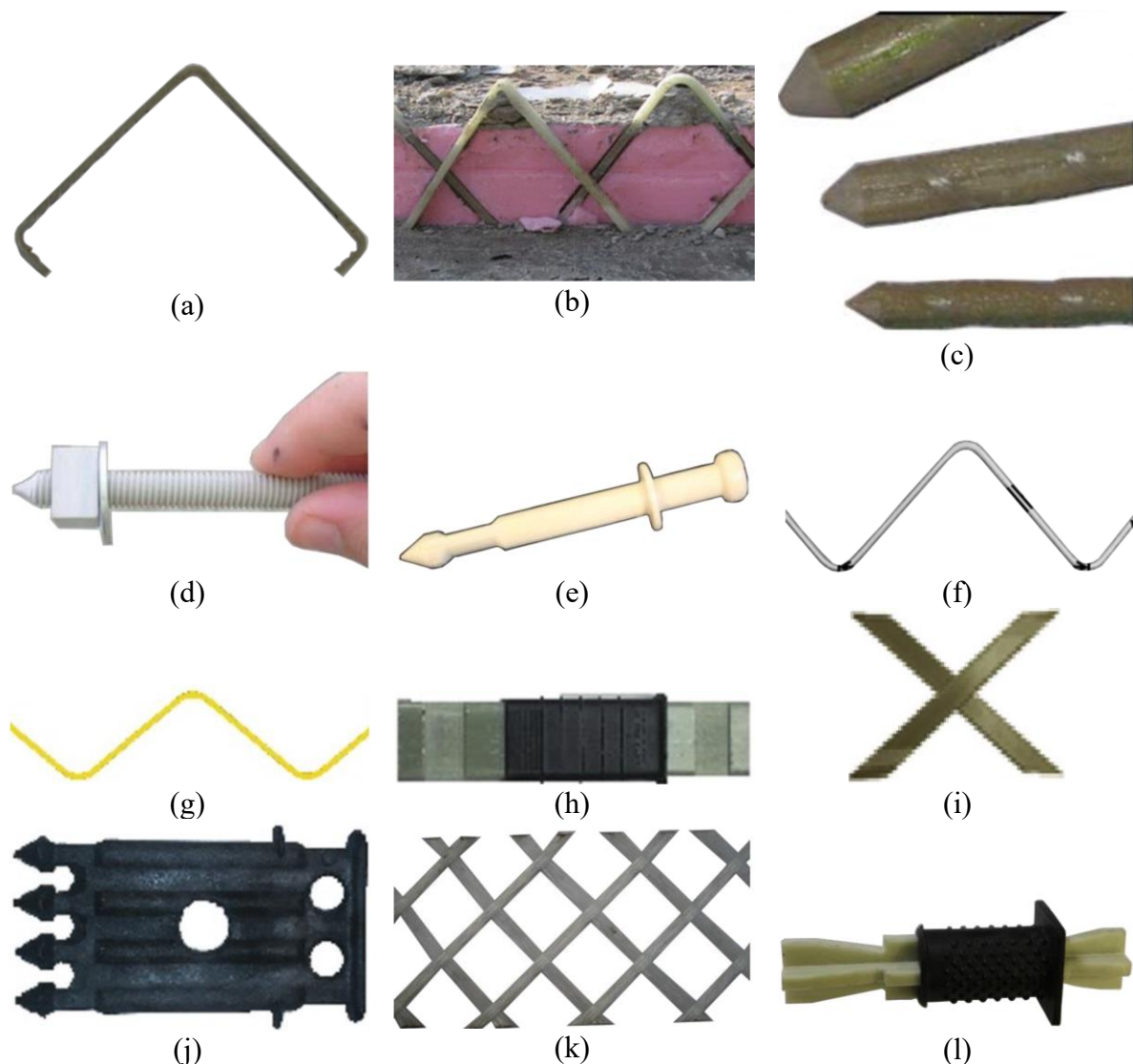


Figura 2.5 – Tipos de conectores constituídos por GFRP: (a) formato em “C” (MAXIMOS *et al.*, 2007); (b) barras treliçadas (OH; JANG; YUN, 2013); (c) barras com nervuras (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (d) barras roscadas (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (e) pinos (WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013); (f) barras treliçadas (CHOI, KI BONG *et al.*, 2015); (g) barras treliçadas (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (h) pino compósito (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (i) cruz (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (j) chapa corrugada (AL-RUBAYE *et al.*, 2018); (k) malha (CHOI, WONCHANG; JANG; YUN, 2019); e (l) pino com seção em cruz (HUANG, JUNQI *et al.*, 2020).

Huang e Dai (2019) também contribuíram com o desenvolvimento e a avaliação de uma chapa plana, uma chapa corrugada e um tubo hexagonal, todos em GFRP, para testar a capacidade de resistência ao cisalhamento. O objetivo foi propor conectores unidirecionais e bidirecionais fabricados com um único material para uso em painéis sanduíche.

Os conectores criados por Chen *et al.* (2015) e as soluções em chapas propostas por Huang e Dai (2019) têm grande similaridade com os conectores PERFOFRP introduzidos por Lameiras *et al.* (LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; AZENHA; *et al.*, 2013a; LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; *et al.*, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; VALENTE; *et al.*,

2013; LAMEIRAS, RODRIGO *et al.*, 2021; LAMEIRAS, RODRIGO; VALENTE; BARROS; AZENHA; GONÇALVES, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO; VALENTE; BARROS; AZENHA; GONCALVES, 2018; LAMEIRAS, RODRIGO; BARROS; AZENHA, 2015), que posteriormente foram objeto de estudo de Silva (2020) e Araújo (2023), conforme detalhado no subitem no tópico “2.3.5 Conectores PERFOFRP”.

2.3.4.2.4 Conectores de CFRP

Além dos conectores de GFRP discutidos no item “2.3.4.2.3 Conectores de GFRP”, alguns pesquisadores entre as décadas de 2000 e 2010 voltaram-se para o desenvolvimento de conectores feitos de CFRP, com o intuito de aprimorar o desempenho mecânico dos conectores poliméricos, considerando que a fibra de carbono oferece um desempenho significativamente superior ao da fibra de vidro.

Insel *et al.* (2006) destacaram que o Altus Group® desenvolveu uma malha contínua unidirecional de CFRP, comercialmente chamada de C-GRID®. Essa malha foi proposta pelo fabricante como solução para conectores de cisalhamento, sugerindo que fique posicionada ortogonalmente e paralela ao eixo longitudinal dos painéis. No entanto, buscando aprimorar a eficiência na transferência de cisalhamento entre as camadas de concreto, os autores propuseram uma orientação alternativa para o C-GRID, em uma configuração de treliça, inclinada a 45°, o que proporcionou melhor comportamento mecânico.

Dando continuidade aos estudos sobre a eficiência de conectores de CFRP, Rizkalla *et al.* (2009) conduziram ensaios em escala real em painéis sanduíche submetidos a forças verticais estáticas e forças laterais dinâmicas. As medições de deslocamento e deformação indicaram que os conectores de CFRP, em formato de malha, dispostos de modo a funcionarem como treliças, proporcionaram uma ação compósita total, considerando forças à nível de serviço. Posteriormente, Ekenel (2014) estabeleceu critérios para testes e aceitação a fim de avaliar a capacidade de transferência de cisalhamento entre as camadas de concreto, focando em conectores de CFRP, em formato de malha.

Em sequência a essas análises, Hodicky *et al.* (2015) conduziram ensaios de resistência à tração e compressão em segmentos de painéis sanduíche com conectores de CFRP em forma de malha, variando a espessura do isolamento. Os resultados revelaram que a espessura do material isolante não influenciou significativamente o comportamento dos conectores, que apresentaram desempenho uniforme.

2.3.4.2.5 Conectores de BFRP

A literatura sobre conectores em BFRP ainda é limitada; contudo, destaca-se o estudo de Tomlinson *et al.* (2016), que introduziu conectores em formato de "V". Esse modelo foi projetado para, com a contribuição dos conectores, aprimorar a resistência ao cisalhamento e reduzir o peso dos painéis, objetivos atingidos de forma eficaz pelos pesquisadores. Cabe destacar que o BFRP possui propriedades mecânicas muito semelhantes às do GFRP, o que os torna materiais de comportamento estrutural comparável em diversas aplicações. Ambos apresentam alta resistência à tração e boa durabilidade, características típicas de materiais compósitos, como discutido em *Materials Science and Engineering* (CALLISTER; RETHWISCH, 2021). Essas similaridades tornam o BFRP uma alternativa promissora ao GFRP, dependendo da disponibilidade e das exigências específicas do projeto.

2.3.5 Conectores PERFOFRP

Os conectores PERFOFRP são dispositivos estruturais fabricados a partir de chapas planas de GFRP que possuem furos circulares distribuídos ao longo de sua superfície. Esses furos permitem que o concreto circule através das perfurações, criando pontos de ancoragem que aumentam a aderência entre as camadas de concreto em painéis sanduíche. A concepção dos conectores PERFOFRP visa simplificar o processo de fabricação e permitir ajustes customizados, adequando-se às necessidades específicas de cada projeto de painel.

2.3.5.1 Histórico

O desenvolvimento do conhecimento científico acerca dos conectores PERFOFRP ocorreu de forma gradual, a partir de investigações que buscaram compreender os diferentes mecanismos resistentes e suas contribuições na resposta estrutural das conexões em painéis sanduíche. Nos estudos iniciais conduzidos por Lameiras (2015), evidenciou-se que a ruptura poderia ocorrer em diferentes regiões do conector, não apenas no concreto circundante. Verificou-se a possibilidade de falhas tanto na parte frontal do conector, associadas ao esmagamento do compósito na região de apoio, quanto entre os furos, em função da concentração de tensões nessas áreas. Ainda nesse trabalho, demonstrou-se que a aderência entre o GFRP e o concreto tinha participação significativa na resistência das conexões, com valores de tensão de aderência em torno de 1,09 MPa, indicando que esse mecanismo não poderia ser negligenciado. Outro resultado marcante foi a constatação de que, dependendo do tipo de compósito utilizado, a ruptura poderia se dar nos pinos de concreto formados pelos furos ou no próprio conector, revelando uma interação direta entre o material do conector e o

concreto. Além disso, destacou-se que a frente de concreto desempenhava um papel preponderante na resistência: em determinadas situações, sua contribuição superava a de outros mecanismos, elevando substancialmente a capacidade última das conexões. Observou-se ainda que a presença de furos parecia aumentar não apenas a resistência, mas sobretudo a ductilidade do sistema, ampliando a capacidade de deformação antes da ruptura.

Na sequência, a dissertação de mestrado de Silva (2020) aprofundou a investigação sobre a influência da geometria dos furos, explorando variações no diâmetro, no espaçamento relativo e na quantidade. Foram estudados furos de diferentes tamanhos, incluindo dimensões menores do que as previamente analisadas e diferentes arranjos entre eles. Constatou-se que, de maneira recorrente, as falhas ocorriam na região do conector entre as camadas de concreto, caracterizando a ruptura do GFRP exposto. Embora o tamanho e o espaçamento entre furos não tenham produzido variações significativas na capacidade última, observou-se que essas variáveis exerciam algum efeito, ainda que sutil, tanto na resistência quanto na ductilidade das conexões. Esses resultados contribuíram para consolidar o entendimento de que a geometria dos furos, embora não determinante de forma isolada, desempenha um papel de ajuste fino no desempenho mecânico dos conectores.

Paralelamente a essas contribuições, outros trabalhos acadêmicos têm buscado avaliar variações de material, geometria e processos de fabricação. Estudos internacionais, como os de Huang e Dai (2019), investigaram a influência da espessura e da altura dos conectores, demonstrando que o aumento da altura é mais eficiente para ganhos de resistência do que o aumento da espessura, especialmente em configurações contínuas. Mais recentemente, pesquisas como a de Araújo (2023) ampliaram o campo de estudo ao utilizar fibras naturais, como as de curauá, em substituição às de vidro, evidenciando a viabilidade técnica, ainda que com reduções de capacidade resistente em relação ao GFRP.

Esse panorama revela que, antes do presente trabalho, já se havia construído uma base de conhecimento relevante sobre os modos de ruptura, a influência da frente de concreto, o papel da aderência, a importância da ductilidade e os efeitos das variáveis geométricas e materiais. Contudo, permaneciam lacunas significativas: não havia ainda um entendimento consolidado sobre como esses mecanismos interagem em conectores contínuos e, sobretudo, faltavam bases experimentais suficientemente abrangentes para subsidiar a proposição de modelos de dimensionamento aplicáveis a projetos de engenharia.

2.3.5.2 Modos de ruptura

A ruptura do conector PERFOFRP pode ocorrer de quatro modos distintos (SILVA; LAMEIRAS, 2024), conforme ilustrado na Figura 2.7: (a) ruptura do **GFRP nas extremidades** do conector (Figura 2.6a), com possível fissuração do concreto adjacente (frente de concreto), causada pelo esmagamento; (b) ruptura do **GFRP na região entre camadas de concreto** (Figura 2.6b), acompanhada por fissuras verticais e/ou inclinadas concentradas nessa região; (c) ruptura do **GFRP ancorado** no concreto (Figura 2.6c), com fissuras próximas aos furos; e (d) ruptura dos **pinos de concreto** (Figura 2.6d), caracterizada pelo cisalhamento do concreto nessa área. Preferencialmente, a ruptura não deve ocorrer no GFRP na região entre camadas de concreto, pois, devido à natureza frágil desse material, essa falha tende a ser abrupta, o que não é desejável para materiais que possuem função estrutural, principalmente por questões de segurança. A ruptura do GFRP nas extremidades só ocorre em conectores discretos, os demais modos de ruptura podem ocorrer tanto em conectores discretos, assim como em conectores contínuos. Todos os modos de ruptura são influenciados pela aderência entre o concreto e o GFRP, que é significativa.

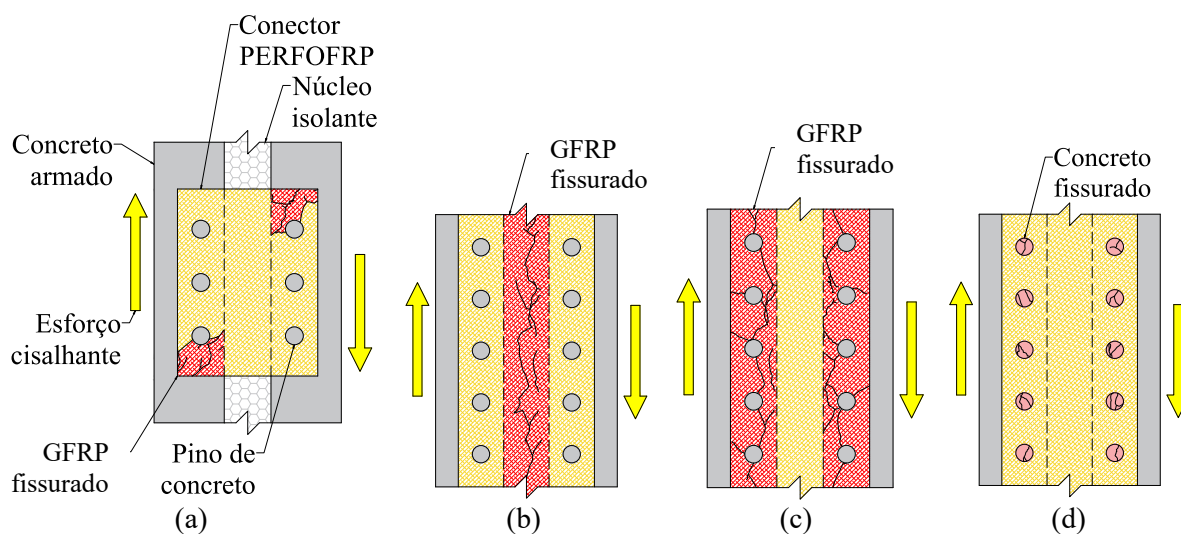


Figura 2.6 – Modos de ruptura do conector PERFOFRP: (a) ruptura do GFRP nas extremidades; (b) ruptura do GFRP na região entre camadas de concreto; (c) ruptura do GFRP ancorado no concreto; e (d) ruptura dos pinos de concreto.

2.3.5.3 Ruptura do GFRP na região entre camadas de concreto

No estudo conduzido por Silva (2020), com divulgação parcial em Silva, Ribeiro e Lameiras (2021), foram realizados ensaios experimentais do tipo *push-out* em conectores PERFOFRP com dimensões de 20 cm por 15 cm (com núcleo isolante com 5 cm de espessura),

objetivando investigar a ruptura na região de GFRP na região entre camadas de concreto, conforme ilustrado na Figura 2.7.

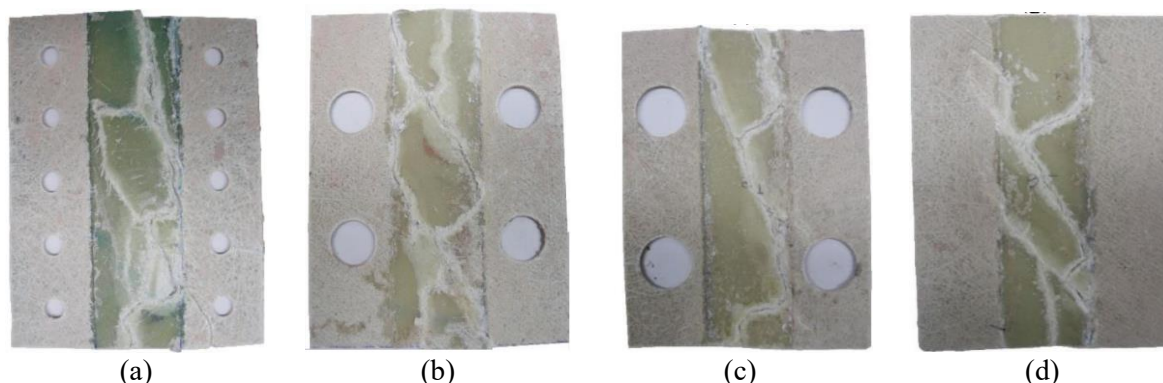


Figura 2.7 – Conectores PERFOFRP com ruptura no GFRP na região entre camadas de concreto com furos com diâmetros de (SILVA, 2020): (a) 12,70 mm; (b) 25,40 mm; (c) 31,75 mm; e (d) sem furos.

Na pesquisa, foram analisadas as variáveis diâmetro, espaçamento e quantidade de furos nos conectores. Os diâmetros avaliados variaram de 6,35 mm a 31,75 mm, enquanto o espaçamento relativo entre os furos (considerando a distância medida entre os centros das perfurações) oscilou entre 1,75 e 3,00, influenciando diretamente a quantidade de furos. No total, foram testadas 13 configurações, incluindo conectores sem furos. Dessas, duas apresentaram erro superior a 10% em relação à capacidade última dos conectores e, por isso, foram excluídas desta revisão. A espessura média dos conectores foi de 2,32 mm, com uma tensão de tração média de 164,24 MPa, conforme dados de caracterização fornecidos pelo autor. A Tabela 2.1 apresenta a média da capacidade última média, o desvio padrão amostral e o coeficiente de variação das configurações testadas.

Tabela 2.1 – Resultados experimentais da capacidade última dos conectores analisados no estudo de Silva (2020).

Diâmetro [mm]	Espaçamento entre furos	Quantidade de réplicas	Capacidade última [kN]	Coeficiente de variação [%]
12,70	1,75	2	32,2	5,7
12,70	2,00	3	31,9	9,6
12,70	2,50	2	30,4	0,9
19,05	2,00	2	26,0	7,1
25,40	1,75	3	24,5	5,8
25,40	2,00	3	27,9	3,6
31,75	2,00	3	25,9	6,2
31,75	3,00	3	26,5	5,5
Sem furos		3	22,2	4,8

Com base nos dados apresentados na Tabela 2.1, foi gerado o gráfico ilustrado na Figura 2.8, que evidencia o impacto da configuração dos furos na capacidade última dos conectores, quando a ruptura ocorreu na região exposta do GFRP. Verifica-se uma diferença sutil, porém visível, no desempenho entre conectores com furos menores (12,70 mm), que exibiram melhor capacidade de carga, e conectores com furos maiores (19,05 mm, 25,4 mm e 31,75 mm), cujo desempenho foi inferior e semelhante ao dos conectores do grupo de controle, que não possuíam furos.

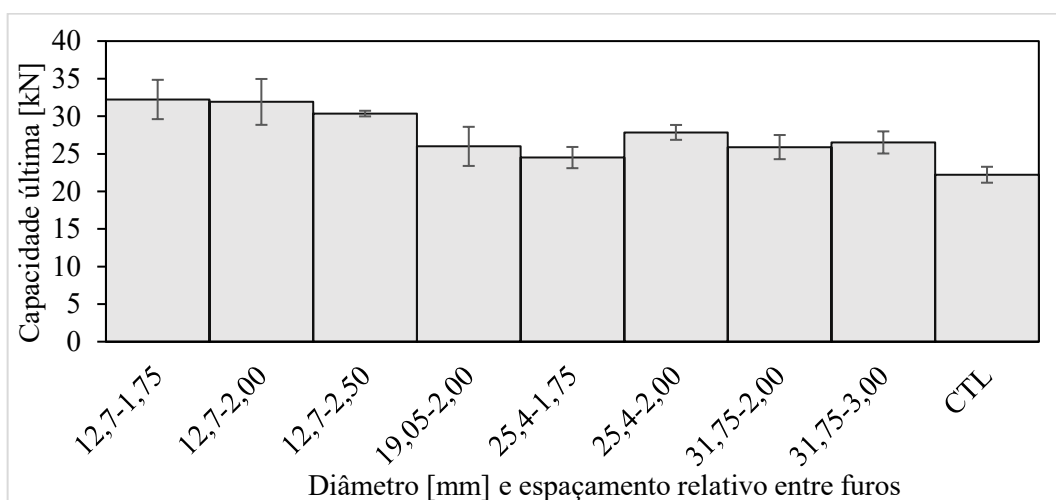


Figura 2.8 – Capacidade última dos conectores da pesquisa de Silva (2020).

Na pesquisa de Huang e Dai (2019), também foram observadas rupturas na região de GFRP na região entre camadas de concreto (Figura 2.9c) em conectores do tipo PERFOFRP. Os autores utilizaram conectores com largura de 166 mm e alturas de 100 mm (espessuras de 1,4 mm e 2,7 mm, Figura 2.9a) e 160 mm (espessuras de 1,3 mm e 2,6 mm, Figura 2.9b). O material dos conectores era um compósito reforçado com tecido de fibras de vidro orientadas bidirecionalmente, com resistência média à tração de 491,1 MPa, conforme ensaios de caracterização fornecido pelos autores. Os resultados dos ensaios *push-out* estão apresentados na Tabela 2.2.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2.2, verifica-se que um aumento médio de 60% na altura dos conectores (de 100 mm para 160 mm) resulta em um incremento médio de 89% na capacidade última (de 15,8 kN para 30,4 kN e de 35,9 kN para 66,4 kN). Da mesma forma, um aumento médio de 96% na espessura dos conectores (de 1,4 mm para 2,7 mm e de 1,3 mm para 2,6 mm) proporciona um ganho médio de 123% na capacidade última (de 15,8 kN para 35,9 kN e de 30,4 kN para 66,4 kN).

Tabela 2.2 – Resultados de capacidade última dos ensaios *push-out* conduzidos por Huang e Dai (2019) em conectores PEFOFRP.

Geometria [mm]		Capacidade última [kN]	Desvio-padrão [kN]	Coeficiente de variação [%]
Altura	Espessura			
100	1,4	15,8	0,3	1,6
100	2,7	35,9	1,1	3,1
160	1,3	30,4	1,3	4,1
160	2,6	66,4	0,9	1,4

Considerando que esses ganhos se desenvolvem de forma aproximadamente linear, pode-se concluir que um aumento de 100% em ambas as dimensões resultaria em um ganho de resistência de 28% ao aumentar a espessura e de 48% ao aumentar a altura. Em outras palavras, o aumento da altura dos conectores gera um ganho de resistência 72% superior em relação ao aumento da espessura.

Portanto, embora o aumento da altura dos conectores possa contribuir para melhorar o desempenho estrutural, essa relação não é necessariamente direta. Em painéis submetidos a ações como o vento, por exemplo, o diagrama de esforços cortantes apresenta máximos próximos aos apoios e valores reduzidos na região central, de modo que o uso de conectores contínuos em toda a altura do painel poderia resultar em aproveitamento ineficiente do material. Além disso, os modos de ruptura observados na parte livre do conector indicam que a eficácia está relacionada à área de corte disponível e à inclinação das fibras tracionadas ou comprimidas. Conectores mais baixos tendem a apresentar inclinações menores que 45°, reduzindo sua eficiência, enquanto aqueles que permitem a formação de faixas de conector próximas a essa inclinação demonstram desempenho superior. Assim, o ganho de resistência não está associado apenas ao aumento da altura em si, mas a uma geometria que possibilite o desenvolvimento de mecanismos resistentes mais eficientes.

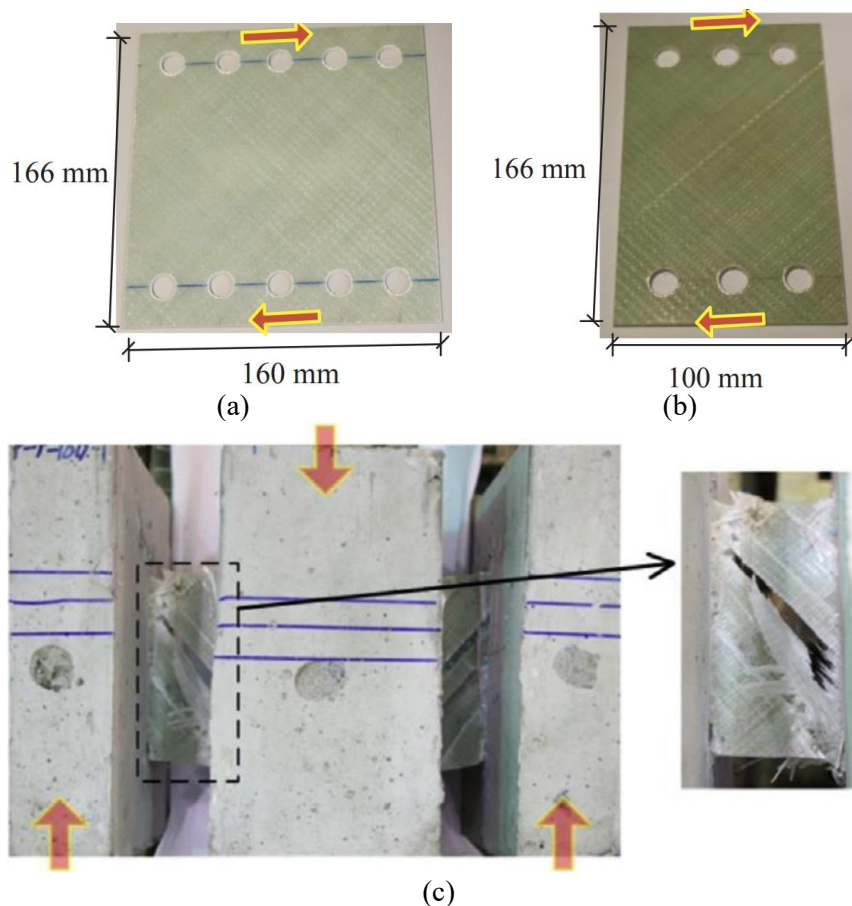


Figura 2.9 – Conectores ensaios por Huang e Dai (2019) com dimensões de: (a) 166 mm por 160 mm e de (b) 166 mm por 100 mm; e (c) aspecto dos conectores após realização dos ensaios *push-out*.

No estudo conduzido por Araújo (2023), foram realizados ensaios *push-out* em conectores com furos de diâmetro igual a 12,70 mm e espaçamento relativo entre os furos de 1,75, seguindo a geometria proposta por Silva (2020). A única modificação realizada foi no tipo de fibra utilizada nos compósitos; em vez de fibras de vidro, foram empregadas fibras de curauá, uma fibra natural originária de uma planta nativa da Amazônia Brasileira. A variável independente analisada foi a gramatura das mantas de fibra, com valores de 1.800 g/m², 2.250 g/m² e 2.700 g/m². Essa variação na gramatura influenciou diretamente a espessura dos conectores, que apresentou valores médios de 6,1 mm, 7,4 mm e 8,2 mm, respectivamente.

Devido à natureza não homogênea das fibras, a caracterização do compósito em ensaios de tração apresentou uma dispersão nos resultados, com valores médios de resistência de 23,0 MPa, 24,8 MPa e 31,6 MPa, correspondendo, respectivamente, às gramaturas de 1.800 g/m², 2.250 g/m² e 2.700 g/m².

Foram identificadas rupturas tanto na região de GFRP na região entre camadas de concreto quanto na região de GFRP ancorado. Conectores com maior gramatura mostraram uma maior propensão a rupturas na região de GFRP ancorado (conforme ilustrado na Figura

2.10). Além disso, verificou-se que o aumento da gramatura resultou em uma maior capacidade de força dos conectores, com valores de 22,5 kN, 25,34 kN e 27,34 kN para gramaturas de 1.800 g/m², 2.250 g/m² e 2.750 g/m², respectivamente.

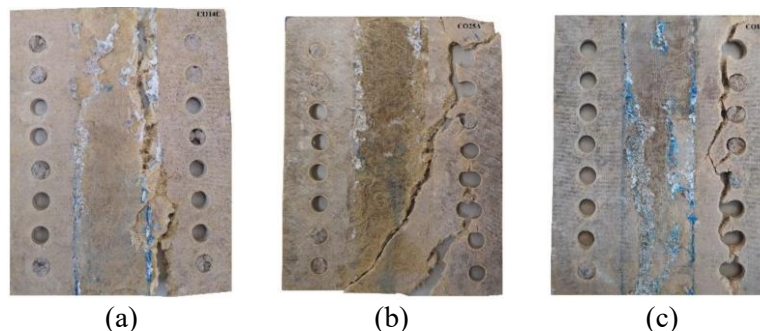


Figura 2.10 – Conectores fabricados com resina poliéster e fibras de curauá, produzidos por Araújo (2023), com gramaturas de: (a) 1800 g/m²; (b) 2250 g/m²; e (c) 2750 g/m².

Os resultados indicam que, embora o aumento da altura dos conectores seja uma estratégia eficiente para melhorar o desempenho estrutural, como evidenciado por Huang e Dai (2019), o uso de conectores com maior espessura também é fundamental para aumentar a estabilidade e rigidez na região de GFRP na região entre camadas de concreto, prevenindo rupturas nessa área. Essas falhas podem ocorrer não apenas pelo esgotamento da capacidade resistente do material, mas também por problemas de instabilidade estrutural.

Além dos aspectos estruturais observados, os resultados indicam a viabilidade da fabricação de conectores com compósitos de fibras naturais. Embora esses conectores apresentem capacidades de força inferiores em comparação aos de GFRP, eles representam uma alternativa atrativa devido ao menor impacto ambiental envolvido em sua produção.

2.3.5.4 Ruptura do GFRP ancorado e ruptura do GFRP nas extremidades

Lameiras (2015) realizou um estudo pioneiro sobre conectores PERFOFRP, no qual conduziu, entre outros testes, uma série de ensaios *push-out* em conectores constituídos por mantas do tipo CSM e tecidos *Stitched Roving Fabric* (SRF). Os resultados dos ensaios com mantas CSM estão apresentados na Tabela 2.3. Nesse trabalho, o autor investigou a influência da frente de concreto (apoio de concreto da borda horizontal do conector) e da presença de furos nos conectores PERFOFRP. Os furos adotados apresentavam diâmetro de 30 mm e espaçamento compatível com recomendações para conectores PERFOBOND, parâmetros definidos em função do diâmetro dos agregados. Os ensaios foram projetados para que a ruptura ocorresse na região do GFRP ancorado, que possuía uma área de contato com o concreto de 45 mm por 300 mm.

Tabela 2.3 – Resultados dos ensaios *push-out* em conectores PERFOFRP fabricados com mantas do tipo CSM, conforme estudo de Lameiras (2015).

Quantidade de furos	Frente de concreto	Capacidade última [kN]	Desvio-padrão [kN]	Coefficiente de variação [%]
0	Não	29,4	2,3	8,0
0	Sim	66,6	5,8	8,7
3	Não	40,1	6,6	16,6
3	Sim	76,9	10,2	13,2

Em conectores fabricados com CSM, foram identificados três modos distintos de ruptura: ruptura do GFRP ancorado (Figura 2.11a), ruptura nas extremidades do GFRP (Figura 2.11b) e ruptura por deslizamento em conectores sem furos e sem frente de concreto (Figura 2.11c).

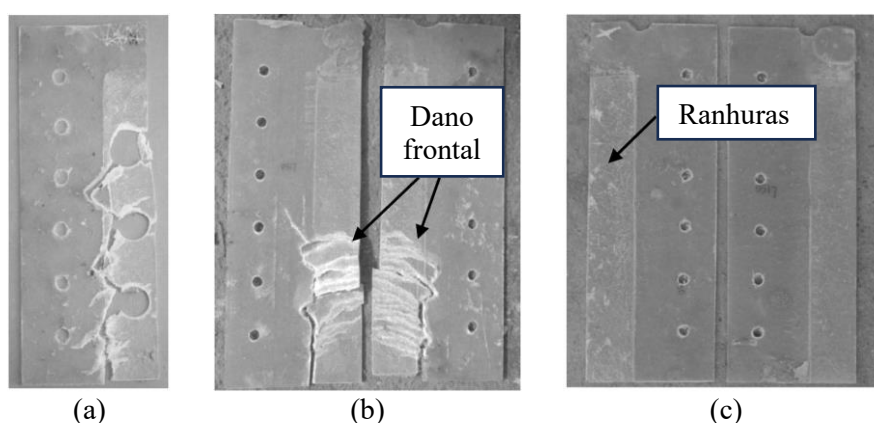


Figura 2.11 – Modos de ruptura observados nos conectores PERFOFRP testados por Lameiras (2015): (a) ruptura no GFRP ancorado; (b) ruptura na frente de concreto; e (c) ruptura por deslizamento.

A inclusão da frente de concreto proporcionou um aumento significativo na capacidade última dos conectores. Nos modelos com furos, o ganho foi de 92% (de 29,4 kN para 66,6 kN), enquanto nos modelos sem furos, o incremento alcançou 127% (de 40,1 kN para 76,9 kN). Esse aumento na resistência é atribuído ao esmagamento localizado do conector em sua extremidade próxima ao apoio, atuando como um mecanismo de reforço pontual.

Nos conectores PERFFORP, conforme comentado na introdução do presente tópico “2.3.5 Conectores PERFOFRP”, o tipo de ruptura possível depende da classificação do conector em discreto ou contínuo. Independentemente do tipo de conector adotado, o espaçamento entre conectores deve obedecer às diretrizes do manual do PCI (2011), variando entre 40 cm e 120 cm. Esse intervalo é aplicável transversalmente em ambas as disposições, mas se aplica longitudinalmente apenas aos conectores discretos. No caso específico dos conectores PERFOFRP ensaiados por Lameiras (2015), considerando a aplicação em configuração discreta e respeitando o espaçamento mínimo recomendado (40 cm), seria

possível posicionar aproximadamente $n_c = 1,43$ conectores por metro de painel. Esse cálculo inclui a altura de um conector (h_c), um espaçamento (s_c) e uma fração do próximo conector, conforme indicado na Equação 2.3. Considerando que cada conector com essas características possui resistência de 76,9 kN, um metro de painel apresentaria uma resistência média aproximada de 109,9 kN, calculada pela relação $76,9 \text{ kN} \times 1,43 = 109,9 \text{ kN}$.

$$n_c = \frac{1,00 \text{ m}}{h_c + s_c} = \frac{1,00 \text{ m}}{0,30 \text{ m} + 0,40 \text{ m}} \cong 1,43 \quad 2.3$$

Por outro lado, o conector perfurado, sem o benefício da frente de concreto, demonstrou uma capacidade última de $Q_{lo,u} = 40,1 \text{ kN}$ para uma altura de $h_c = 30 \text{ cm}$. Quando utilizado de forma contínua, sua resistência corresponde a aproximadamente 133,7 kN/m, conforme demonstrado na Equação 2.4.

$$n_c = \frac{1,00 \text{ m}}{h_c} \times Q_{lo,u} = \frac{1,00 \text{ m}}{0,30 \text{ m}} \times 40,1 \text{ kN} \cong 133,7 \text{ kN} \quad 2.4$$

Assim, mesmo na condição mais favorável de uso do conector discreto, o tipo contínuo apresenta resistência 21,7% maior. Essa análise, contudo, baseia-se em uma premissa simplificada de distribuição uniforme dos esforços entre os conectores, hipótese que pode ser válida em situações específicas, como durante o içamento dos painéis, mas que dificilmente representa com precisão a distribuição de esforços em serviço, como no caso das ações de vento. Além disso, deve-se considerar que os conectores PERFOFRP não apresentam comportamento tão dúctil quanto os conectores PERFOBOND de aço, o que limita a possibilidade de redistribuição de esforços entre os conectores. Essa limitação reforça a necessidade de cautela na extrapolação direta de modelos simplificados de dimensionamento.

Outro dado relevante extraído do estudo de Lameiras (2015) é a tensão de aderência entre o GFRP e o concreto. Essa tensão foi determinada pela razão entre a força aplicada ao conector sem furos e sem frente de concreto (29,4 kN) e a área de contato entre o GFRP e o concreto ($45 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 2 = 270 \text{ cm}^2$), resultando em um valor de 1,09 MPa.

2.4 Avaliação de desempenho dos painéis sanduíche

A literatura técnica apresenta um amplo conjunto de estudos voltados à avaliação do desempenho estrutural de painéis sanduíche, com foco na resposta desses sistemas sob

diferentes tipos de carregamento. Essas investigações buscam compreender os mecanismos resistentes envolvidos, considerando a interação entre os materiais constituintes e os efeitos associados à geometria, aderência e rigidez dos elementos de ligação. Os painéis podem ser submetidos a esforços de cisalhamento, compressão axial, flexão ou combinações desses efeitos, a depender de sua função na estrutura e das ações atuantes ao longo da vida útil (SAH *et al.*, 2024).

Além disso, os painéis sanduíche apresentam um comportamento mecânico complexo devido à natureza não linear de seus materiais constituintes e à interação entre os diferentes componentes. Essa complexidade tem levado os pesquisadores a basear suas investigações principalmente em estudos experimentais, que são frequentemente complementados por análises analíticas e/ou numéricas simplificadas para melhor compreender o desempenho desses sistemas em condições reais de uso (BENAYOUNE *et al.*, 2006).

Neste tópico “2.4 Avaliação de desempenho dos painéis sanduíche” são revisados os principais métodos experimentais empregados na caracterização do comportamento mecânico dos painéis sanduíche, com ênfase nos resultados obtidos em ensaios de cisalhamento (Seção 2.4.1), compressão (Seção 2.4.2), flexão (Seção 2.4.3), flexo-compressão (Seção 2.4.4) e de longa duração (Seção 2.4.5).

2.4.1 Ensaios de cisalhamento

O ensaio *push-out* é uma técnica amplamente empregada para avaliar e comparar o desempenho de diferentes mecanismos de conexão por cisalhamento. Esse método foi originalmente desenvolvido para analisar a capacidade de transferência de esforços em seções compósitas de aço e concreto, permitindo avaliar a eficiência do conector sob forças de cisalhamento. Posteriormente, sua aplicação foi estendida para o estudo de conectores de cisalhamento em painéis sanduíche, devido à necessidade de validar e comparar diferentes tipos de conexões nesses sistemas. Devido à sua eficácia em simular condições de carregamento reais e fornecer dados confiáveis, o teste *push-out* tornou-se uma referência recomendada para a aceitação e validação de novos conectores de cisalhamento (EKENEL, 2014).

Naito *et al.* (2012) investigaram o comportamento ao cisalhamento de quatorze tipos de conectores comerciais, fabricados em aço, GFRP, BFRP e CFRP. Os testes mostraram variações significativas na resistência, rigidez e deformabilidade desses conectores. Para os conectores discretos, a resistência média ao cisalhamento variou de 5,5 kN a 18,5 kN, enquanto para os conectores contínuos os valores ficaram entre 17,2 kN/m e 57,8 kN/m. A rigidez dos conectores foi fortemente influenciada pela sua configuração geométrica. Conectores com

formato de treliça apresentaram maior rigidez inicial em comparação aos em formato de pino, que trabalham principalmente em flexão. Além disso, o uso de isolamento em EPS, em conjunto com conectores treliçados de CFRP, aumentou a resistência ao cisalhamento em 21% em relação ao isolamento de XPS.

Woltman, Tomlinson e Fam (2013) realizaram 50 ensaios *push-out* em corpos de prova com dimensões de 254 mm por 254 mm por 900 mm, utilizando exclusivamente conectores de cisalhamento discretos. Os testes envolveram três tipos de conectores: barras de GFRP, barras de aço e barras de FRP, todos comercialmente disponíveis. Os conectores de FRP apresentaram as menores resistências ao cisalhamento, os de GFRP, resistências intermediárias, e os conectores de aço, as maiores. As variações no tamanho, espaçamento, formato da seção transversal (circular ou retangular) e tratamento das extremidades dos conectores de GFRP tiveram efeito insignificante na resistência ao cisalhamento. O estudo também comparou a resposta dos corpos de prova, com conectores de GFRP, fabricados com material isolante aderido ou não ao concreto. Com isso, constatou-se que a aderência, ou o atrito, entre o concreto e o isolante contribuem significativamente para a resistência total.

Cho *et al.* (2012) conduziram uma série de ensaios de *push-out* para avaliar o desempenho de conectores de cisalhamento constituídos por placas perfuradas, fabricadas em FRP, utilizadas em lajes mistas de FRP e concreto. Os corpos de prova variavam em quantidade e tamanho de furos, com o objetivo de investigar como esses parâmetros influenciavam a resistência dos conectores. As curvas carga-deslocamento obtidas experimentalmente possibilitaram uma análise detalhada do comportamento mecânico dos conectores. Com base nessas curvas, foram derivadas equações constitutivas por meio de análise de regressão, que se mostraram eficazes para análise e projeto de conexões com materiais e geometrias similares aos conectores avaliados.

Choi *et al.* (2015) investigaram o comportamento ao cisalhamento de corpos de prova com dois tipos distintos de materiais isolantes, XPS e EPS, avaliando a presença ou ausência de conectores de cisalhamento feitos de barras dobradas de GFRP. Nos espécimes sem conectores de cisalhamento, a resistência e a rigidez ao cisalhamento na interface entre o concreto e o isolamento de XPS foram superiores às obtidas em espécimes com isolamento de EPS. Entretanto, essa tendência se inverteu nos espécimes que possuíam conectores de cisalhamento; nesses casos, o isolamento de EPS apresentou maior resistência em comparação com o XPS. Foi observado, também, que o uso do EPS resultou em uma falha mais dúctil, caracterizada pela ruptura no próprio isolamento. Já para os espécimes com isolamento de XPS, a falha ocorreu devido à perda da aderência entre o XPS e o concreto. Nos ensaios realizados

com conectores de GFRP, constatou-se uma diferença significativa na capacidade de cisalhamento ao aumentar o comprimento de ancoragem dos conectores, destacando variações entre os isolamentos de EPS e XPS para diferentes comprimentos de ancoragem.

Pahn e Hanz (2012) conduziram, também, seis testes de cisalhamento direto para avaliar como o tipo de material isolante afeta a aderência entre o concreto e o isolamento. Os corpos de prova foram compostos por blocos de concreto com dimensões de 300 mm de largura, 300 mm de comprimento e 150 mm de espessura, moldados sobre placas de isolamento de EPS ou XPS. A força foi aplicada paralelamente à interface entre o concreto e o isolamento, até que a aderência falhasse. Em seguida, realizou-se um teste de atrito por deslizamento. Os resultados mostraram que a tensão máxima de cisalhamento na interface XPS-concreto representa apenas 16% do valor obtido para a interface EPS-concreto. Os valores médios da tensão máxima de cisalhamento foram significativamente maiores nos corpos de prova com EPS-concreto em comparação aos com XPS-concreto.

Outros estudos baseados em testes de cisalhamento direto também indicaram que o isolamento de EPS proporciona maior resistência ao cisalhamento do que o isolamento de XPS (HYUN-DO; SEOK-JOON; YOUNG-CHAN, 2012). Diversas pesquisas concluíram que o material isolante exerce uma contribuição significativa na resistência ao cisalhamento do painel (OH; JANG; YUN, 2013; WOLTMAN; TOMLINSON; FAM, 2013). Em função de sua superfície mais áspera, o EPS apresenta uma maior contribuição para essa resistência quando comparado ao XPS. No entanto, a influência do material isolante é frequentemente desconsiderada pelos projetistas após a instalação do painel, pois espera-se que ciclos de congelamento-descongelamento ou variações térmicas enfraqueçam a aderência do isolante ao longo do tempo (EKENEL, 2014).

Hodicky *et al.* (2015) conduziram uma ampla investigação experimental sobre o comportamento ao cisalhamento de conectores contínuos, formados por malhas de CFRP. Para aprofundar o estudo, foi desenvolvido um modelo tridimensional, não linear, em Elementos Finitos (EF), seguido de uma análise paramétrica, com o intuito de prever a resistência ao cisalhamento dos conectores fabricados com diferentes materiais de FRP. Os resultados indicaram que a substituição das malhas de CFRP por de BFRP ou por de GFRP levou a uma redução na resistência ao cisalhamento de 5 a 10% e de 10 a 25%, respectivamente.

Maximos *et al.* (2007) realizaram testes comparativos entre conectores de GFRP em formato de “V” e em conectores constituídos por treliças soldadas de aço, disponíveis comercialmente. Os resultados mostraram que, em termos de tensão, os conectores de GFRP alcançaram apenas 31% de sua resistência à tração, devido à combinação de esforços axiais, de

flexão e de cisalhamento atuando durante o ensaio de cisalhamento. Em contraste, os conectores de aço apresentaram um desempenho mais eficiente, pois foram capazes de redistribuir as tensões após o início do escoamento, mantendo sua resistência.

Kazem *et al.* (2015) realizaram, por seu turno, uma investigação sobre o impacto da exposição climática de curto prazo na capacidade de cisalhamento dos painéis sanduíche e seus conectores. Os resultados indicaram que, após sete meses de exposição, o desempenho dos painéis e conectores apresentou impacto insignificante.

2.4.2 Ensaios de compressão

Embora os ensaios de flexão e de cisalhamento sejam os mais frequentemente realizados em painéis sanduíche, outras formas de teste também têm sido conduzidas. Quando propostos como elementos estruturais, alguns painéis sanduíche foram avaliados sob carregamento axial, a fim de compreender seu desempenho sob esse regime de esforços (AMRAN *et al.*, 2016; TOMLINSON, DOUGLAS; FAM, 2016).

Estudos conduzidos por Mohamad *et al.* (2011) e Suryani e Mohamad (2012) avaliaram o desempenho de oito painéis sanduíche com conectores de aço, em formato de treliça, sob carregamento axial. Os painéis foram projetados com diferentes razões de esbeltez e incorporaram camadas de concreto leve, caracterizadas por baixa densidade e baixa resistência. Apesar de apresentarem regiões maciças de concreto nas extremidades, os resultados mostraram que esses painéis possuem uma capacidade estrutural inferior à de uma seção considerada como totalmente compósita.

Foram avaliados, também, o comportamento de painéis sanduíche de concreto armado submetidos a carregamentos axiais e excêntricos. Os painéis avaliados possuíam diferentes razões de esbeltez, mantendo-se constante a largura. As camadas de concreto armado apresentavam espessura uniforme, enquanto o material isolante espessura variável. Os conectores de aço, em formato de treliça, responsáveis por garantir a ligação entre as camadas de concreto, percorriam toda a altura dos painéis, os quais apresentavam regiões de concreto maciço nas bordas superior e inferior. Os resultados experimentais indicaram que as primeiras fissuras surgiram em diferentes percentuais da força de ruptura, dependendo da natureza do carregamento, seja axial ou excêntrico. Nos painéis submetidos a forças excêntricas, a falha foi caracterizada pela separação das camadas de concreto na parte superior do painel. A resistência dos painéis diminuiu de forma não linear com o aumento da esbeltez, sendo essa redução mais acentuada para os carregamentos excêntricos. Em ambos os casos, os painéis demonstraram comportamento compósito até a ruptura (BENAYOUNE *et al.*, 2006, 2007).

Gara *et al.* (2012a) investigaram painéis sanduíche moldados *in situ*, compostos por camadas de concreto projetado reforçadas por malhas metálicas e conectadas por barras de aço de pequeno diâmetro e regiões de concreto maciço. Foram realizados testes de compressão com forças axiais e excêntricas, variando a espessura da camada de EPS, utilizando placas corrugadas e lisas. Nos testes axiais, a força foi aplicada no eixo do painel, enquanto nos testes excêntricos, que também foram realizados, foi aplicada no eixo de apenas uma das camadas de concreto. Os resultados experimentais e as simulações numéricas mostraram que os painéis apresentaram comportamento parcialmente compósito, com capacidades últimas que diminuía conforme a esbeltez dos painéis aumentava. Para forças axiais, as capacidades últimas se aproximaram do dimensionamento à flambagem; enquanto para forças excêntricas, as capacidades últimas foram menores, requerendo análise não linear para previsão. Os autores destacaram a necessidade de mais pesquisas para desenvolver métodos de previsão das capacidades últimas sob diferentes condições de excentricidade.

2.4.3 Ensaios de flexão

A flexão causada pelo vento é uma forma comum de carregamento que afeta todos os elementos no envoltório da edificação. Por esse motivo, grande parte das pesquisas sobre painéis sanduíche pré-moldados de concreto tem se concentrado em analisar o comportamento desses painéis sob flexão. Dentre os métodos de ensaio, os testes de flexão em três pontos (CHEN *et al.*, 2015) e quatro pontos (WILLIAMS PORTAL *et al.*, 2017) são os mais utilizados. Isso se deve à facilidade de execução desses ensaios com equipamentos laboratoriais convencionais, como sensores de deslocamento, células de carga, macacos hidráulicos e pórticos de reação. Nesse contexto, diversos estudos experimentais foram conduzidos ao longo das últimas décadas, com o objetivo de investigar o desempenho estrutural dos painéis sob flexão, considerando diferentes configurações construtivas e tipos de conectores.

Bush e Stine (1994) conduziram ensaios de flexão em painéis sanduíche pré-moldados, utilizando diferentes conectores e configurações construtivas. Os painéis foram constituídos por camadas de concreto protendido separadas por uma camada de EPS. Os ensaios demonstraram que, ao utilizar conectores de treliça de aço dispostos longitudinalmente e isolamento de EPS, é possível alcançar uma elevada rigidez e um grau significativo de ação compósita à flexão, ambos superiores a 80%. Os resultados evidenciaram, ainda, a importante contribuição do isolamento para o comportamento compósito dos painéis. Adicionalmente, verificou-se que as peças de ancoragem destinadas à desforma e ao manuseio, comuns em painéis pré-moldados e que geralmente atravessam ambas as camadas de concreto, têm maior

influência na resistência ao cisalhamento longitudinal do que os próprios conectores. Para simular tensões térmicas cíclicas, foram realizados testes de fadiga, que indicaram uma pequena perda de rigidez após repetidos ciclos de carga, atribuída à deterioração da aderência entre o concreto e o material isolante.

Dando continuidade às investigações experimentais com conectores metálicos, Pessiki e Mlynarczyk (2003) investigaram o comportamento à flexão de painéis sanduíche em escala real, compostos por regiões de concreto maciço e conectores de aço, em formato de pino e em formato de "M". Os resultados indicaram que, apesar de os painéis com regiões de concreto maciço atingirem um elevado grau de ação compósita (92%), fissuras de flexão surgiram antecipadamente devido às concentrações de tensão nos conectores. Em ensaios realizados com painéis sem conectores, a aderência entre o isolamento de XPS e as camadas de concreto proporcionou apenas 5% para a ação compósita total. Além disso, o uso de conectores em formato de "M" alcançou apenas 10% da ação compósita, comparada a uma configuração que combinava regiões de concreto maciço, conectores em formato de "M" e isolamento de XPS.

Em continuidade à análise do desempenho de conectores metálicos, Benayoune *et al.* (2008) realizaram um estudo experimental para avaliar o comportamento à flexão de painéis sanduíche com conectores de cisalhamento em forma de treliça de aço. Foram testados seis corpos de prova, variando em diferentes dimensões e proporções. Todos os painéis possuíam camadas de concreto armado com 40 mm de espessura. Os resultados dos ensaios indicaram que a capacidade última e o grau de ação compósita estavam fortemente associados à rigidez dos conectores de cisalhamento empregados. De modo geral, os conectores de cisalhamento em formato de treliça proporcionaram um elevado grau de ação compósita nos painéis testados.

Com a crescente adoção de materiais poliméricos reforçados com fibras, Einea *et al.* (1994) passaram a investigar o comportamento de conectores de GFRP, incluindo barras dobradas, por meio de ensaios à flexão em painéis sanduíche. Os conectores GFRP apresentaram ação compósita adequada, com valores de 65% para painéis sem aderência entre o concreto e o material isolante e 85% para painéis de referência. Sob forças de flexão, esses conectores foram submetidos a esforços combinados de flexão e compressão ou tração. Maximos *et al.* (2007) confirmaram resultados semelhantes em testes executados em painéis em escala real, mas avaliando o desempenho sob forças distribuídas.

Avançando na comparação entre diferentes tipos de conectores, Salmon *et al.* (1997) compararam o comportamento à flexão de painéis sanduíche com conectores de aço, em formato de treliça, e conectores de GFRP, fabricados com barras dobradas. Os resultados

mostraram que os painéis com conectores de GFRP atingiram 82% de ação compósita, enquanto os painéis com treliças de aço alcançaram 88%, ambos sob forças de serviço. Posteriormente, Maximos *et al.* (2007) analisaram detalhadamente o desempenho dos conectores GFRP, formados por barras dobradas e recomendaram que, em projetos que utilizem esses conectores, sua ruptura seja dimensionada para ocorrer somente o escoamento da armadura longitudinal, permitindo um aviso prévio de falha estrutural.

Explorando outras configurações geométricas de conectores de GFRP, Choi *et al.* (2015) e Kim e You (2015) investigaram o comportamento de painéis sanduíche com conectores de cisalhamento de GFRP em formato de malha. Foram analisadas diferentes configurações construtivas, variando-se os tipos de concreto e de material isolante, entre EPS e XPS, além da aplicação de tratamentos superficiais diretamente no isolante. Os ensaios de flexão em quatro pontos mostraram que, nos painéis com EPS, a resistência à flexão variou em função da direção da força aplicada e da quantidade de conectores. Quando submetidos a forças direcionadas para baixo, os painéis apresentaram resistência relativamente uniforme; já sob forças aplicadas para cima, verificou-se maior sensibilidade ao número de conectores, devido à redução da aderência entre o concreto e o EPS. O grau de ação compósita variou entre 26% e 57%, conforme os parâmetros analisados.

Dando continuidade à avaliação de conectores de GFRP, com foco na comparação entre diferentes tipologias construtivas, Chen *et al.* (2015) conduziram um estudo sobre o comportamento à flexão de seis painéis sanduíche com conectores de GFRP. Os painéis foram construídos com duas fileiras de conectores, além de zonas sólidas de concreto em cada extremidade para facilitar a transmissão de esforços de cisalhamento. Observou-se que, nos painéis com conectores segmentados e contínuos, a primeira falha ocorreu devido à flexão, enquanto, nos painéis com conectores discretos, a falha inicial foi associada à ruptura por cisalhamento. O grau de ação compósita, determinado a partir das deflexões, variou conforme o tipo de conector: 68% para conectores discretos, 84% para segmentados e 93% para contínuos. O estudo concluiu que conectores segmentados e contínuos apresentaram melhor desempenho do que os discretos, desaconselhando, portanto, o uso destes últimos.

Avançando na avaliação de conectores de GFRP com geometrias específicas voltadas à otimização do desempenho estrutural, Pantelides *et al.* (2008) realizaram ensaios de flexão em quatro painéis sanduíche, utilizando conectores de cisalhamento de GFRP em formato de tubo cilíndrico. Os resultados demonstraram que esses conectores foram capazes de promover ação compósita total em termos de resistência, além de conferir elevada ductilidade ao sistema. Com base nesses dados, os autores desenvolveram um guia de projeto voltado à

determinação da quantidade de conectores necessária para que o painel atinja sua resistência última ao momento fletor, considerando uma configuração estrutural totalmente compósita.

Com base em ensaios como os apresentados anteriormente, diversos métodos têm sido propostos para estimar o grau de ação compósita a partir de resultados obtidos em ensaios de flexão. Kim e You (2015) determinaram esse grau comparando a capacidade última de painéis parcialmente compósitos com os valores obtidos em painéis totalmente compósitos e não compósitos. Nos modelos totalmente compósitos, a plena interação entre as camadas de concreto foi garantida por nervuras espessas que promoviam a ligação integral entre as faces. Em contraste, os painéis não compósitos não possuíam conectores de cisalhamento, o que resultou em capacidade limitada de transferência de esforços entre as camadas.

Complementando essa abordagem comparativa, Tomlinson e Fam (2015) empregaram um método baseado na resistência para avaliar o grau de ação compósita sob diferentes condições de solicitação, considerando as capacidades última, de escoamento e de serviço. Verificaram que esse tipo de abordagem resultou em variações significativas no grau de ação compósita, com valores entre 51% e 90%. Ao comparar esses resultados com os obtidos por meio do método baseado na rigidez, proposto por Pessiki e Mlynarczyk (2003), cujos graus variaram de 3,0% a 6,9%, ficou evidente a discrepância entre as duas metodologias. Ainda que baseadas em princípios distintos, ambas as abordagens dependem de ensaios experimentais em escala real para validação dos resultados, como os realizados por Lameiras (2015), que avaliou o grau de ação compósita em painéis submetidos à flexão utilizando conectores PERFOFRP contínuos.

2.4.4 Ensaios de flexo-compressão

Além de resistirem a forças de flexão, os painéis sanduíche estruturais também devem ser capazes de transmitir, por meio de esforços de compressão, as reações provenientes do telhado ou da laje até a fundação ou o piso. Essa dupla função exige que o sistema se comporte adequadamente sob ações combinadas, o que inclui simultaneamente solicitações axiais e de flexão. Entretanto, a complexidade envolvida na execução de ensaios com esse tipo de carregamento tem limitado a quantidade de pesquisas disponíveis na literatura. Ainda assim, alguns estudos experimentais já foram conduzidos com aplicação de compressão axial concêntrica e/ou excêntrica. Entre os principais trabalhos, destacam-se os de Benayoune *et al.* (2006), Benayoune *et al.* (2007), Frankl *et al.* (2011) e Gara *et al.* (2012b).

Dentre essas investigações, merecem destaque os estudos de Frankl *et al.* (2011) e de Rizkalla, Hassan e Lucier (2009), que avaliaram o comportamento de painéis sanduíche com

conectores de PRFC, em formato de malha, submetidos a condições típicas de serviço. Os ensaios foram realizados em escala real, com aplicação simultânea de forças verticais e laterais, além da variação nas configurações dos conectores e dos isolantes térmicos (EPS e XPS). Os resultados indicaram que a rigidez e as deflexões dos painéis são influenciadas tanto pelo tipo e arranjo do sistema de transferência de cisalhamento quanto pelo tipo de isolante utilizado. Verificou-se, ainda, que o uso de EPS proporcionou um grau de ação compósita superior ao do XPS, atingindo valores próximos à ação compósita total quando combinados com conectores, em formato de malha, de PRFC.

2.4.5 Ensaios de longa duração

A literatura sobre o comportamento dependente do tempo em painéis pré-moldados de concreto com isolamento incorporado é relativamente limitada, mas alguns estudos recentes têm fornecido avanços significativos. Hopkins *et al.* (2017) realizaram um dos primeiros programas experimentais sistemáticos de fluência em painéis sanduíche de concreto, conectados por barras de polímero reforçado com fibras. Os ensaios foram conduzidos por períodos entre 150 e 250 dias, em regime de flexão sustentada, e compararam o desempenho de painéis sanduíche com o de painéis maciços. Os resultados evidenciaram que a deformação por fluência compromete a rigidez efetiva dos sistemas, ressaltando que os modelos de dimensionamento devem considerar explicitamente tais efeitos ao estimar deslocamentos e deflexões de longo prazo.

Huang *et al.* (2020) ampliaram a análise ao investigar experimental e numericamente o efeito combinado de fluência e retração em painéis pré-moldados com isolamento de poliestireno expandido e conectores diagonais de GFRP. O programa experimental incluiu quatro painéis ensaiados sob cargas sustentadas durante 120 dias: dois em flexão a quatro pontos e dois em compressão axial excêntrica. Os resultados mostraram que a fluência reduziu em até 27% a capacidade residual dos painéis comprimidos, revelando a suscetibilidade ao fenômeno de instabilidade progressiva (*creep buckling*). O modelo numérico desenvolvido em ABAQUS apresentou boa correlação com os dados experimentais, permitindo análises paramétricas que confirmaram a influência crítica da excentricidade de carregamento, do diâmetro dos conectores e da resistência do concreto na estabilidade de longo prazo.

Complementando esses estudos, Nafadi *et al.* (2021) avaliaram o desempenho de painéis sanduíche pré-moldados e protendidos com isolamento contínuo de EPS e XPS, conectados por grades de CFRP. O programa experimental incluiu seis painéis em escala real, dos quais quatro foram submetidos a dois milhões de ciclos de carregamento lateral reverso sob

força axial constante, simulando condições de vento de serviço ao longo da vida útil. Os resultados demonstraram que os ciclos de fadiga não provocaram degradação significativa, e todos os painéis suportaram esforços muito acima das cargas de projeto. Além disso, verificou-se que o tratamento superficial da camada de XPS aumentou a aderência com o concreto e melhorou a ação compósita, resultando em maior capacidade de resistência. Esse estudo evidencia que a durabilidade e a integridade estrutural podem ser mantidas mesmo sob condições severas de carregamento prolongado.

Em conjunto, os trabalhos de Hopkins *et al.* (2017), Huang *et al.* (2020) e Nafadi *et al.* (2021) fornecem uma base sólida para compreender os mecanismos de fluência, retração e fadiga em painéis pré-moldados com isolamento incorporado. Apesar das diferenças em geometrias, tipos de conectores e condições de carregamento, todos convergem para a constatação de que os efeitos dependentes do tempo podem reduzir significativamente a rigidez e a capacidade estrutural, sendo imprescindível incorporá-los em modelos de projeto para garantir segurança e durabilidade desses sistemas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi estruturado em quatro etapas principais, visando atingir os objetivos definidos no item “1.1 Objetivos”. Essas etapas consistiram na realização de ensaios de cisalhamento duplo, sendo cada série orientada pelos seguintes propósitos:

- a) avaliar o comportamento do conector quando a ruptura ocorre na região do GFRP ancorado no concreto, variando o espaçamento entre os furos e a distância entre o furo e a borda (Série 1);
- b) investigar o comportamento do conector ao isolar os principais mecanismos resistentes, de modo a compreender sua contribuição individual para a resistência global (Série 2);
- c) investigar a possibilidade de customização dos conectores por meio do aumento da espessura na região situada entre camadas de concreto, de modo a avaliar se essa modificação pode alterar o modo de ruptura observado e evitar a falha nessa região (Série 3);
- d) examinar o comportamento do conector na região do GFRP ancorado no concreto, variando a quantidade e o diâmetro dos furos, de modo a identificar a influência dessas variáveis em seu desempenho (Série 4).

Antes da execução de cada etapa experimental, foi realizada a etapa de fabricação dos compósitos utilizados na confecção dos conectores. Esse procedimento, comum a todas as fases da pesquisa, é descrito no item “3.1 Confecção dos conectores”. Em seguida, o item “3.2 Ensaio *push-out*” apresenta a metodologia adotada nos ensaios, que também foi mantida ao longo de todas as etapas. O planejamento de cada série, com a definição das variáveis investigadas, é detalhado no tópico “3.4 Planejamento experimental”. Por fim, o item “3.5 Processamento dos dados” descreve os métodos utilizados para a análise dos resultados obtidos.

3.1 Confecção dos conectores

Os conectores foram produzidos a partir de chapas planas perfuradas (com furos circulares) feitas em GFRP. As chapas foram confeccionadas utilizando dez (Série 1) ou cinco (Séries 2, 3 e 4) camadas de mantas de fibra de vidro do tipo CSM, embebidas em resina poliéster. Cada manta apresenta uma gramatura de 450 g/m² e foram empilhadas de forma a alcançar a gramatura total estipulada para o estudo: 4.500 g/m² (Série 1) ou 2.250 g/m² (Séries 2, 3 ou 4). Essa configuração foi escolhida por ser uma solução de menor custo em comparação às fibras orientadas, mas que já demonstrou ser eficaz para este tipo de aplicação

em estudos anteriores, como os de Silva, Ribeiro e Lameiras (2021) e na dissertação de Silva (2020). Esses trabalhos indicam que o uso de mantas do tipo CSM é adequado para conectores em GFRP, garantindo bom desempenho mecânico e custo-benefício.

O processo de fabricação, realizado por infusão de resina a vácuo (Figura 3.1), teve início com a preparação de uma placa de vidro, delimitando a área destinada à confecção da chapa. Sobre essa superfície, foram aplicados os seguintes componentes, na ordem indicada: três camadas de desmoldante de cera de carnaúba, uma camada de tecido sintético tipo *peel ply*, um número específico (n_f) de camadas de mantas de fibra de vidro, seguida de outra camada de tecido *peel ply*, uma tela de fluxo de ar (*air flow*), e, por último, uma camada de filme de vácuo. O filme foi selado em seu perímetro externo utilizando fita *tacky tape*. Dois furos foram realizados próximos às bordas longitudinais da chapa para inserir conexões em "T", sendo uma ligada à tubulação da bomba de vácuo e a outra ao reservatório de resina. Válvulas de controle foram estrategicamente posicionadas para regular os fluxos de ar e resina durante o processo.

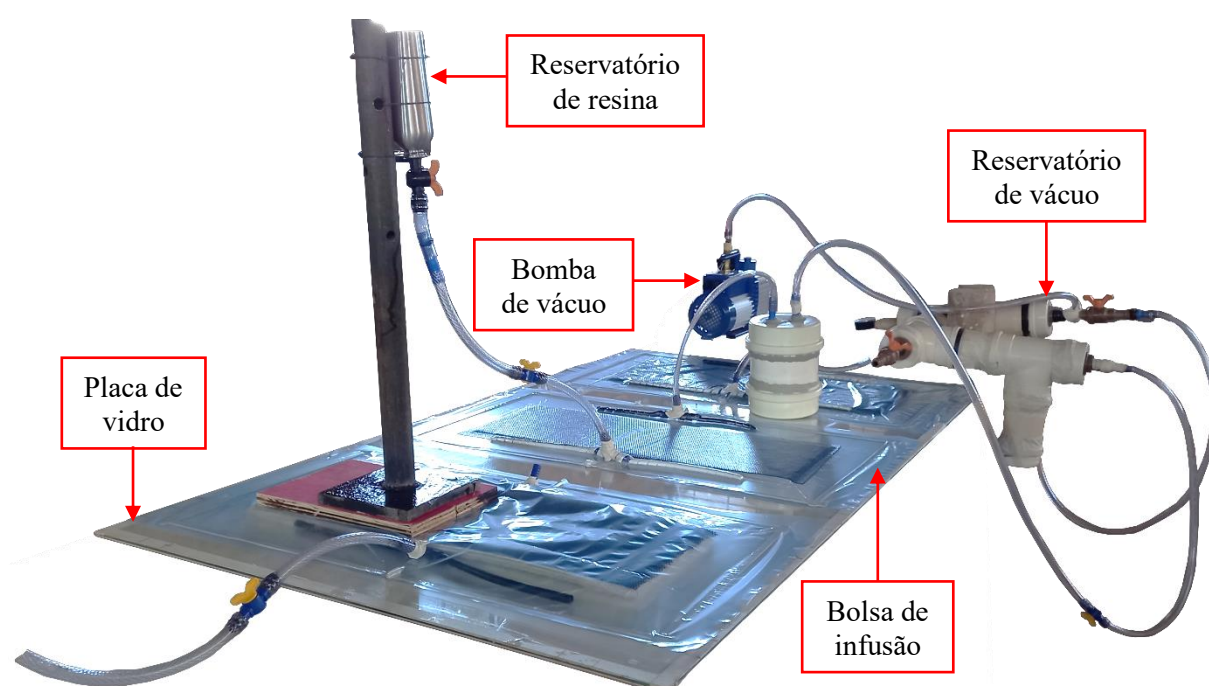


Figura 3.1 – Processo de fabricação das chapas de GFRP utilizando a técnica de infusão por resina à vácuo.

Após as chapas serem fabricadas (Figura 3.2a), o próximo passo consistiu em cortá-las e perfurá-las de modo a apresentarem a geometria desejada para os conectores (Figura 3.2c e Figura 3.2d) e para os corpos de prova destinados à caracterização (Figura 3.2b). Na Figura 3.2d), S_h indica o espaçamento entre os furos, tomando como referência o centro das perfurações; enquanto S_b representa a distância entre o centro dos furos e a **borda interna do**

conector, que corresponde à linha projetada que delimita a interface entre o concreto e o material isolante.

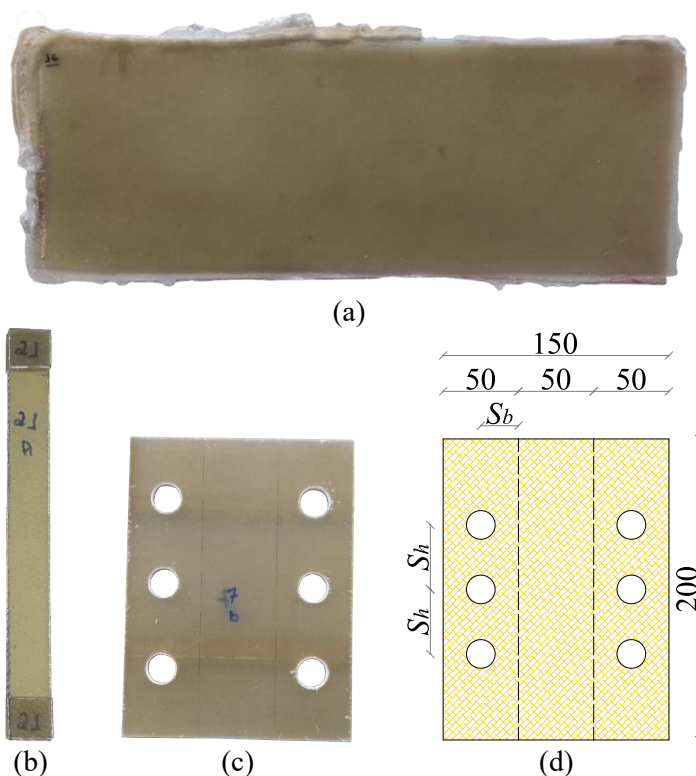


Figura 3.2 – Processo de fabricação dos conectores a partir das chapas de GFRP: (a) chapa bruta de GFRP; (b) corpo de prova para caracterização; (c) exemplo de conector fabricado; (d) exemplo de modelo genérico de conector parametrizado por meio das distâncias S_h e S_b , com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

Além do processo de fabricação e usinagem, foi realizada uma estimativa do custo de produção dos conectores considerando apenas os materiais empregados (Tabela 3.1). Adotou-se como referência uma placa de 70×25 cm, da qual se obtêm quatro conectores de 15×20 cm. Cada placa foi constituída por dez camadas de manta de fibra de vidro de 450 g/m^2 , totalizando cerca de 0,79 kg de fibra, associadas a aproximadamente 1,0 kg de resina poliéster ortoftálica. Também foram contabilizados os consumíveis do processo de infusão a vácuo, como *peel ply*, *flow media*, filme de vácuo, fita *tacky tape*, espiraduto (considerando reaproveitamento em cinco utilizações), registros, conexões, além de pequenas quantidades de cera de carnaúba e estopa. Os preços unitários foram obtidos em diferentes fornecedores e tratados por meio da média de pelo menos três cotações. Com base nesses parâmetros, o custo médio estimado foi de aproximadamente R\$ 118,30 por placa, o que corresponde a cerca de R\$ 29,60 por conector, valor que representa exclusivamente o consumo de materiais.

Tabela 3.1 – Estimativa de custos de materiais para a fabricação dos conectores PERFOFRP.

Item	Consumo por placa	Preço médio unitário [R\$]	Custo por placa [R\$]	Custo por conector [R\$]
Manta de fibra de vidro 450 g/m ²	0,79 kg	22,79	17,95	4,49
Resina poliéster ortoftálica	1,00 kg	38,43	38,43	9,61
<i>Peel ply</i>	0,35 m ²	32,53	11,38	2,85
<i>Air flow</i>	0,175 m ²	21,93	3,84	0,96
Filme de vácuo	0,50 m ²	23,96	11,98	3,00
Fita <i>tacky tape</i>	2,0 m	3,63	7,26	1,82
Espiraduto (reuso 5×)	0,28 m	6,79	1,90	0,48
Conexões tipo T (2 un)	2 un	3,40	6,81	1,70
Registros plásticos (2 un)	2 un	8,47	16,94	4,24
Cera de carnaúba	10 g	0,13	1,35	0,34
Estopa	20 g	23,05	0,46	0,12
Total	–	–	118,30	29,61

3.2 Ensaios *push-out*

Para avaliar o comportamento dos conectores sob forças de cisalhamento, foram realizados ensaios *push-out* em todas as séries experimentais. Esse método foi adotado por sua eficácia em simular a transferência de esforços entre as camadas de concreto nos painéis sanduíche. A seguir, são descritos os procedimentos de montagem dos corpos de prova, a execução dos ensaios e os dispositivos empregados.

3.2.1 Montagem dos corpos de prova

Após a fabricação dos conectores, as fôrmas foram montadas com a disposição adequada do aço, do material isolante (EPS) e dos conectores (Figura 3.3a), de acordo com a geometria desejada. Os corpos de prova e a configuração do ensaio adotado seguiram o modelo proposto por Huang e Dai (2019), posteriormente também empregado em Silva (2020), o que assegura a comparabilidade dos resultados obtidos. Como adaptação específica deste trabalho, todos os corpos de prova de cada série foram concretados em uma única betonada, utilizando concreto fornecido por usina, com agregado de dimensão máxima de 12,5 mm e abatimento de 120 mm. Após o enrijecimento e a cura da mistura, os artefatos foram desmoldados (Figura 3.3b) e submetidos à caracterização mecânica (compressão, tração e módulo de elasticidade). Por fim, o material isolante foi removido (Figura 3.3c), a fim de eliminar a influência do atrito entre o isolamento e o concreto no comportamento do conector, sendo o EPS utilizado apenas para fins construtivos.

Nas Séries 1, 2 e 4, chapas de aço com 2,0 mm de espessura foram fixadas com resina poliéster em ambas as faces das regiões expostas do GFRP (Figura 3.3d), em todos os

conectores, com o propósito de evitar rupturas nessa área, que não constituía o foco de análise dessas etapas. Na Série 3, por outro lado, essa mesma região dos conectores recebeu reforços adicionais de GFRP, com espessura variável.

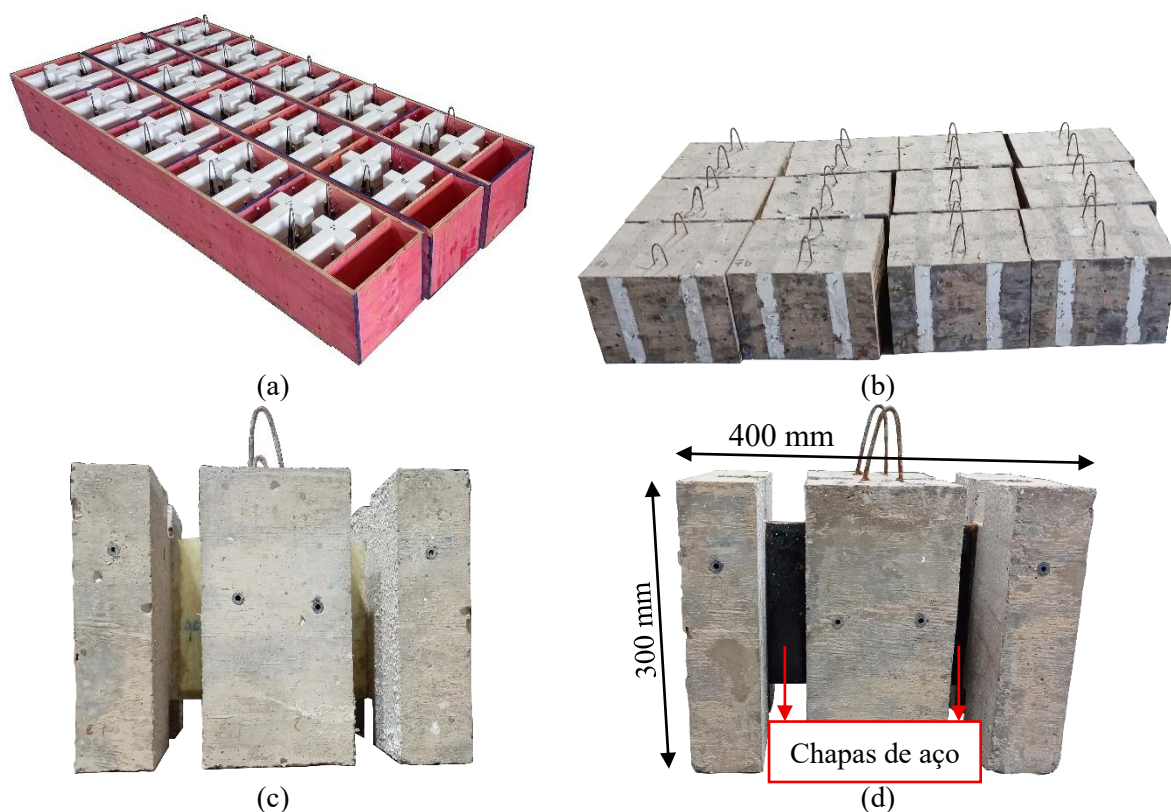


Figura 3.3 – Montagem dos corpos de prova: (a) disposição dos componentes nas fôrmas; (b) corpos de prova após concretagem; (c) corpo de prova da Série 3 com o material isolante removido; (d) corpos de prova das Séries 1, 2 e 4 com placas de aço fixadas na região de GFRP na região entre camadas de concreto.

Em todas as séries, os modos de ruptura nos “pinos de concreto”, no “GFRP ancorado” e/ou no “GFRP na região entre camadas de concreto” foram intencionalmente induzidos, eliminando-se a região de concreto associada à ruptura do tipo “GFRP na extremidade”. Esse procedimento foi realizado mediante a inserção de pequenos blocos de EPS na área destinada ao concreto que provocaria essa forma de ruptura, antes do processo de concretagem. Esse procedimento também teve como objetivo afastar os conectores tanto dos apoios quanto do ponto de aplicação da força, a fim de evitar concentrações de tensões nessas regiões, que poderiam provocar a ruptura prematura do GFRP. Dessa forma, assegurou-se um distanciamento mínimo de 5 cm entre os conectores e os apoios, bem como em relação ao ponto de aplicação da força.

Essa configuração, que elimina a presença de concreto à frente do conector, é mais representativa para conectores de cisalhamento contínuos, cujo comportamento estrutural

depende predominantemente da interação entre o GFRP e o concreto adjacente às suas faces ou presente nos furos. Além disso, mesmo no caso de conectores discretos, a adoção dessa medida pode ser considerada uma abordagem conservadora e alinhada à segurança estrutural, ao evitar acréscimos de resistência decorrentes da reação do concreto frontal, cuja contribuição seria difícil de quantificar em situações práticas, especialmente quando se trabalha com diferentes comprimentos de conectores e com sua inserção em distintas regiões do painel sanduíche. Por fim, após a finalização do processo de confecção, os corpos de prova resultaram em elementos compostos por três camadas de concreto interligadas por dois conectores de cisalhamento (Figura 3.4). Para evitar fissuração precoce do concreto durante os ensaios experimentais, foram utilizadas armaduras longitudinais de 10 mm de diâmetro e transversais de 8 mm de diâmetro. Como a Figura 3.4 apresenta apenas vistas bidimensionais da geometria dos corpos de prova, optou-se por complementar a descrição com representações tridimensionais ilustradas na Figura 3.5.

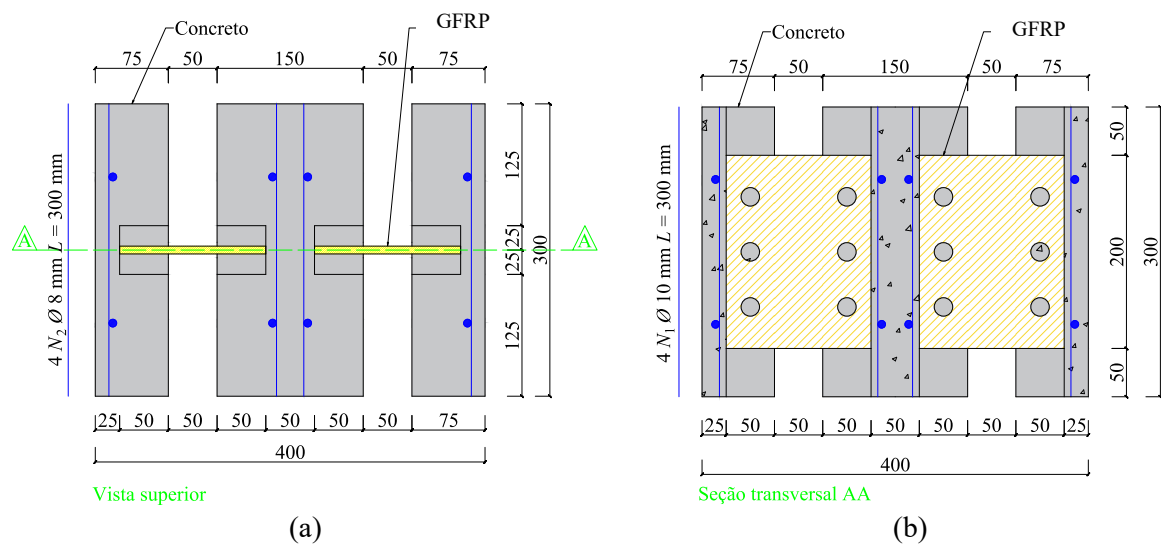


Figura 3.4 – Geometria dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento duplo: (a) vista superior; e (b) seção transversal, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

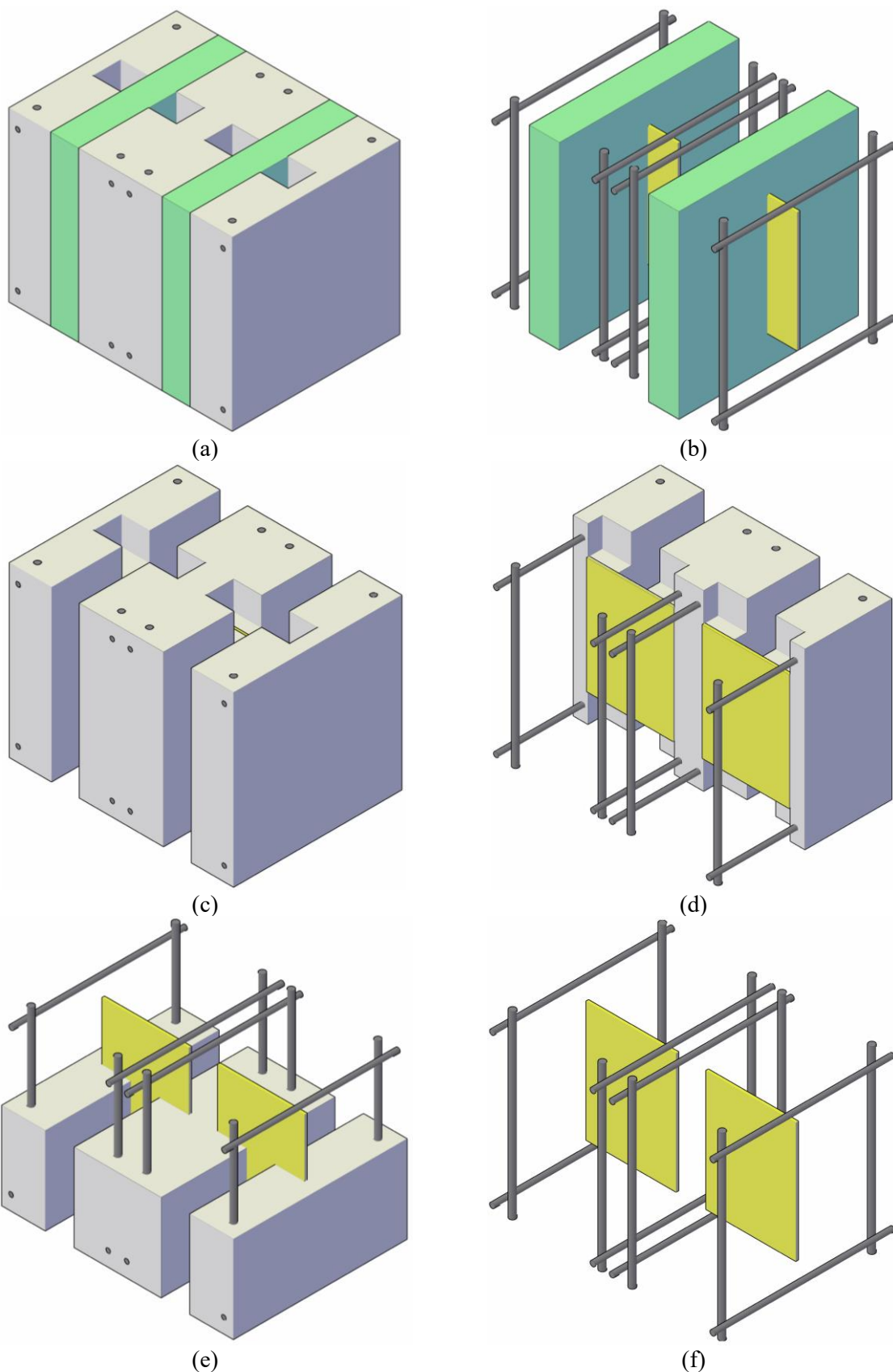


Figura 3.5 – Representação tridimensional dos corpos de prova para ensaios *push-out*: (a) corpo de prova completo; (b) com eliminação do concreto; (c) com retirada do material isolante; (d) com remoção total do material isolante e parcial da face frontal do concreto; (e) com eliminação total do material isolante e parcial da parte superior do concreto; e (f) com remoção total tanto do concreto quanto do material isolante.

3.2.2 Execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados em uma prensa universal com controle de deslocamento do êmbolo (Figura 3.6). As camadas externas de concreto foram apoiadas, enquanto a força foi aplicada à camada interna até o limite de curso dos transdutores de deslocamento (aproximadamente 15 mm para os menores e 50 mm para os maiores). O processo de aplicação da força foi dividido em dois estágios: um estágio inicial de aproximadamente 30 minutos, com uma velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min, e um estágio final, com o restante do ensaio (cerca de 1h00min) a uma velocidade de 0,5 mm/min. Essa divisão teve como objetivo otimizar o tempo total de execução de cada ensaio, que foi de aproximadamente 2 horas, incluindo mobilização, realização do ensaio e desmobilização.

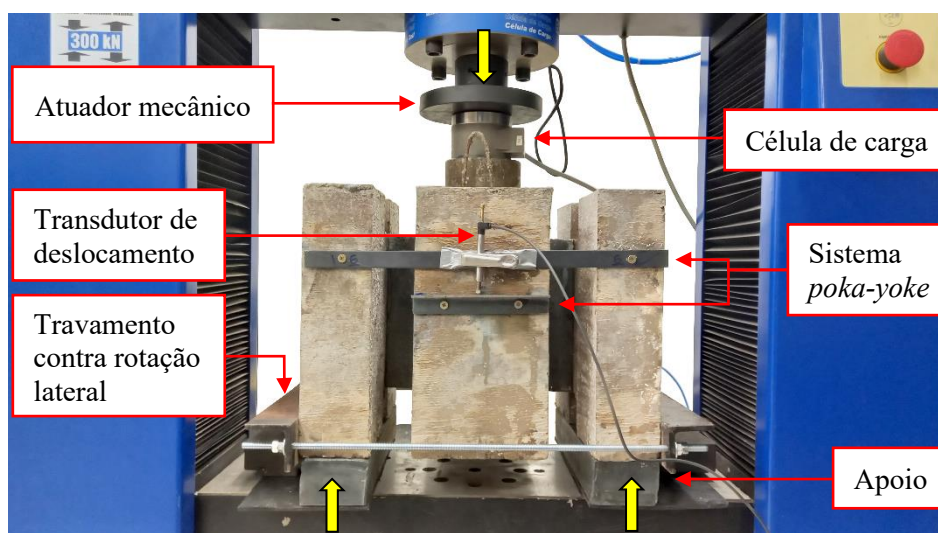


Figura 3.6 – Equipamentos utilizados para execução do ensaio de cisalhamento duplo.

Os esforços verticais, medidos por meio de uma célula de carga, foram transferidos aos conectores, submetendo-os ao cisalhamento. Os deslocamentos relativos entre as camadas externas e a camada interna de concreto foram registrados por dois transdutores de deslocamento, fixados com um sistema *poka-yoke* para garantir precisão e segurança. Esses transdutores foram estrategicamente posicionados nas faces frontal e posterior dos corpos de prova. Após a conclusão dos ensaios, os corpos de prova foram demolidos e os conectores extraídos com cuidado.

O sistema *poka-yoke* é um método de engenharia aplicado para prevenir erros e garantir a confiabilidade das medições. No contexto deste experimento, ele foi empregado para assegurar a fixação adequada dos transdutores de deslocamento e evitar desalinhamentos ou movimentos indesejados durante os ensaios.

3.3 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais utilizados neste estudo (aço, concreto e GFRP) foi realizada por meio de ensaios experimentais que visaram determinar suas propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Para o aço, foram realizados ensaios de tração conforme as especificações da norma ABNT NBR ISO 6892-1 (2024), utilizando corpos de prova extraídos dos vergalhões. As medições incluíram o limite de escoamento, a resistência à ruptura e o módulo de elasticidade, sendo os resultados obtidos por meio de curvas de força versus deformação.

O concreto foi caracterizado por ensaios de compressão e de tração por compressão diametral, realizados em corpos de prova cilíndricos, de acordo com as normas ABNT NBR 5739 (2018) e ABNT NBR 7222 (2011), respectivamente. Além disso, o módulo de elasticidade foi determinado por meio de ensaios de compressão cíclica com medição de deformações, conforme a norma ABNT NBR 8522 (2021).

No caso do GFRP, os ensaios de tração foram conduzidos com base na norma ASTM D3039/D3039M-17 (2017), utilizando corpos de prova confeccionados a partir de chapas planas de GFRP fabricadas com mantas de fibra de vidro do tipo CSM e resina poliéster. As deformações foram medidas com o auxílio de um *clip-gauge*, com um comprimento de referência de 50 mm. Para evitar danos ao equipamento, as medições de deformações foram interrompidas ao atingir aproximadamente 0,006 mm/mm.

3.4 Planejamento experimental

No presente tópico, é detalhado o planejamento experimental de cada uma das quatro séries de ensaios, abordando as variáveis estudadas e a forma de identificação de cada conector.

3.4.1 Série 1

A Série 1 tem o duplo objetivo avaliar o comportamento dos conectores de GFRP quando os furos são aproximados entre si e quando os furos são aproximados em direção à borda interna do conector (ver definição no item 3.1). As distâncias testadas entre os furos foram de 57 mm, 40 mm e 30 mm, todas medidas a partir do centro de cada perfuração. Já as distâncias testadas entre o centro dos furos e a borda interna do conector foram 15 mm, 25 mm e 35 mm.

Nessa etapa da pesquisa, foram concretados 31 corpos de prova, com três réplicas para cada configuração e quatro réplicas destinadas ao grupo controle. No entanto, devido a

problemas identificados durante o processo de concretagem, seis corpos de prova precisaram ser descartados, resultando, assim, na realização de 25 ensaios válidos.

As expressões “ $S_1 - S_h - S_b - r$ ” e “ $S_1 - C_{TL} - r$ ” apresentam o sistema de identificação dos conectores da Série 1. Nessa notação, S_h indica a distância entre os furos, em milímetros [mm], tomando como referência o centro das perfurações; S_b representa a distância perpendicular entre o centro dos furos e a borda interna do conector, também em milímetros [mm]; e C_{TL} designa o grupo controle. Além disso, para cada réplica r , são acrescentados os valores A, B ou C, de acordo com a nomenclatura padronizada para distinção das amostras. Dessa forma, foi elaborada a Tabela 3.2, que mostra a identificação de todos os conectores testados nesta série experimental. A tabela apresenta, também, o número de réplicas utilizadas para cada configuração.

Tabela 3.2 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 1.

Código de identificação	S_h [mm]	S_b [mm]	Quantidade de réplicas
S1-57-35	57	35	3
S1-57-25	57	25	3
S1-57-15	57	15	2
S1-40-35	40	35	3
S1-40-25	40	25	1
S1-40-15	40	15	3
S1-30-35	30	35	2
S1-30-25	30	25	3
S1-30-15	30	15	2
S1-CTL	–	–	3
Total			25

Também foi elaborada a Figura 3.7a, que apresenta a vista superior dos conectores da Série 1. Essa representação é válida para todos os conectores da mesma série, razão pela qual foi exibida uma única vez. Já a Figura 3.7b mostra a vista frontal do conector do grupo controle, destacando suas dimensões e a diferenciação entre as regiões com e sem enrijecedores.

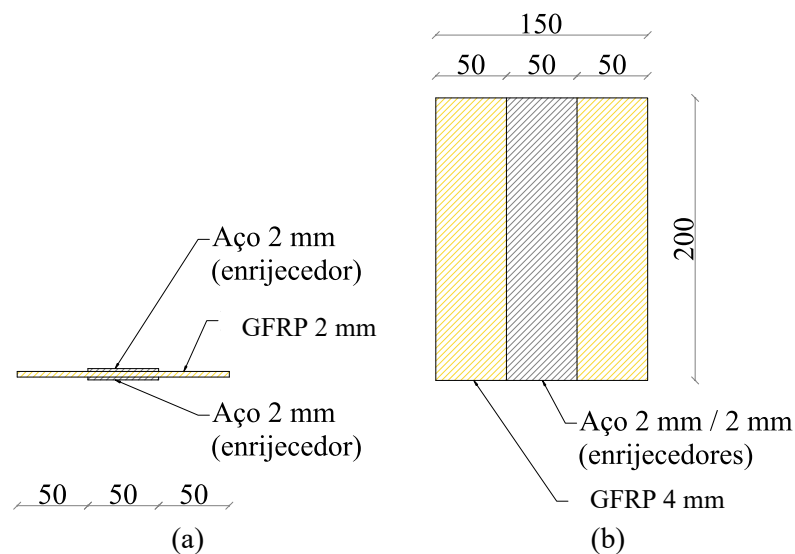


Figura 3.7 – Conectores da Série 1: (a) vista superior; e (b) vista frontal do conector do grupo controle, que não possui furos, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

De forma análoga à Figura 3.7b, a Figura 3.8 apresenta a vista frontal de cada conector com furos da Série 1, destacando o posicionamento das perfurações. Nessa série, foi adotado um diâmetro fixo de 19 mm para todos os furos. Esse valor foi selecionado por representar uma dimensão intermediária: suficientemente grande para influenciar o comportamento do conector, mas não tão grande a ponto de restringir a variação dos espaçamentos entre os furos e entre os furos e as bordas. Além disso, trata-se de uma medida padronizada (3/4 pol), comumente disponível em gabaritos de perfuração, o que favoreceu a execução uniforme dos conectores.

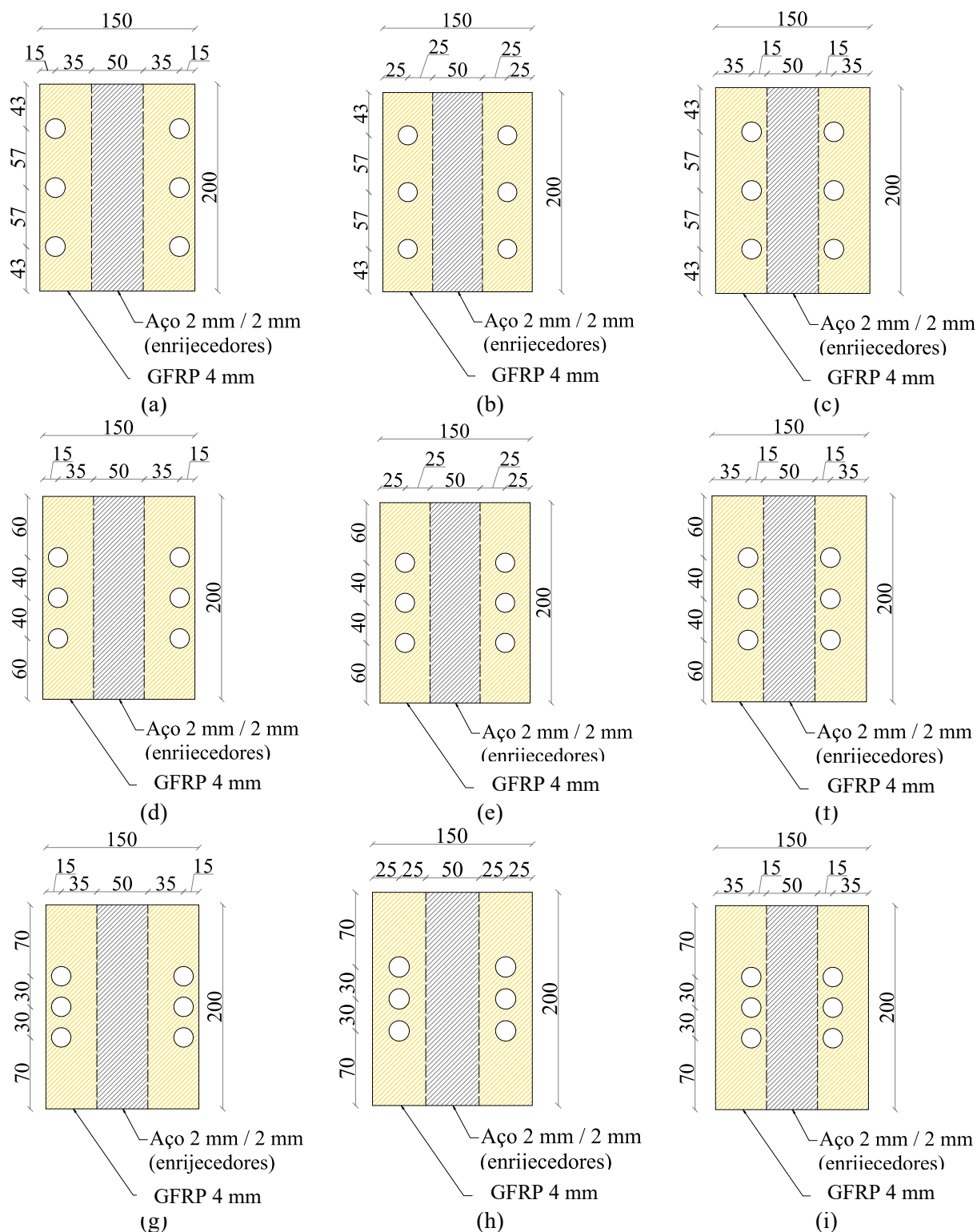


Figura 3.8 – Vista frontal dos conectores, com perfurações, da Série 1: (a) S1-57-35; (b) S1-57-25; (c) S1-57-15; (d) S1-40-35; (e) S1-40-25; (f) S1-40-15; (g) S1-30-35; (h) S1-40-25; e (i) S1-40-15.

3.4.2 Série 2

A Série 2 tem como objetivo avaliar o comportamento dos conectores de GFRP ao induzir diferentes modos de ruptura. Para isso, foram manipuladas três variáveis independentes: a resistência do material do conector, a resistência do material dos pinos (ou seja, o material

que atravessa os furos dos conectores) e a aderência entre o GFRP e o concreto. Essas variáveis foram avaliadas isoladamente ou em conjunto, introduzindo modificações específicas nos conectores. Essas modificações incluíram: a aplicação de uma manta de teflon na superfície dos conectores (para eliminar a aderência entre o concreto e o GFRP), a inserção de uma barra de aço através dos furos (para aumentar a resistência e rigidez do material que atravessa os furos) e a substituição do GFRP por aço no conector (com o objetivo de aumentar a resistência do material do conector).

Na Série 2, foi adotada a configuração geométrica do conector S1-57-35, incluindo o diâmetro dos furos de 19 mm e o espaçamento de $S_h = 57$ mm e $S_b = 35$ mm. Essa escolha foi realizada porque, conforme será demonstrado nos resultados da Série 1, essa configuração apresentou um bom comportamento mecânico do ponto de vista de resistência, além de ser a que apresentou o melhor desempenho em termos de ductilidade.

As expressões “ $S_2 - M_t - P_c - r$ ” e “ $S_2 - C_{TL} - r$ ” definem o sistema de identificação dos conectores da Série 2. Nessa nomenclatura, M_t identifica o material do conector, podendo ser GFRP (FRP) ou aço (A36); e P_c refere-se a características específicas dos conectores, que podem incluir uma ou mais modificações, como EA (*Elimination of Adhesion*) e/ou RH (*Reinforcement Passing through the Hole*). Caso nenhuma modificação seja aplicada, P_c não assume valor. Cada réplica r é identificada com os valores A, B ou C, seguindo a nomenclatura padronizada para diferenciação das amostras. Assim, a Tabela 3.3 foi elaborada para apresentar de maneira organizada a identificação dos conectores testados nesta série experimental.

Tabela 3.3 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 2.

Código de identificação	Material	Característica particular	Qtd. de réplicas
S2-FRP	GFRP	—	3
S2-FRP-EA	GFRP	Eliminação da aderência entre o concreto e o GFRP	3
S2-FRP-RH	GFRP	Reforço com barras de aço passando pelos furos	3
S2-FRP-EA/RH	GFRP	Eliminação da aderência; reforço nos furos	3
S2-A36-EA	Aço	Eliminação da aderência	3
S2-CTL	GFRP	—	3
Total			18

A Figura 3.9a apresenta a vista superior dos conectores da Série 2 confeccionados em GFRP, enquanto a Figura 3.9b mostra os conectores da mesma série fabricados em aço, também em vista superior.

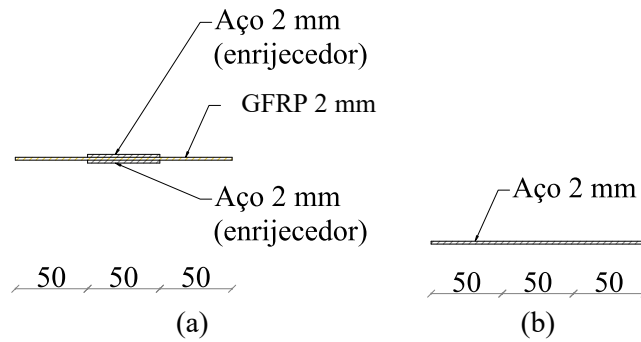


Figura 3.9 – Vista superior dos conectores da Série 2: (a) conectores fabricados em GFRP; e (b) conectores fabricados em aço, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

Complementando essa representação, a Figura 3.10 foi elaborada com o objetivo de apresentar a vista frontal de todos os conectores avaliados na Série 2, facilitando a comparação entre suas características.

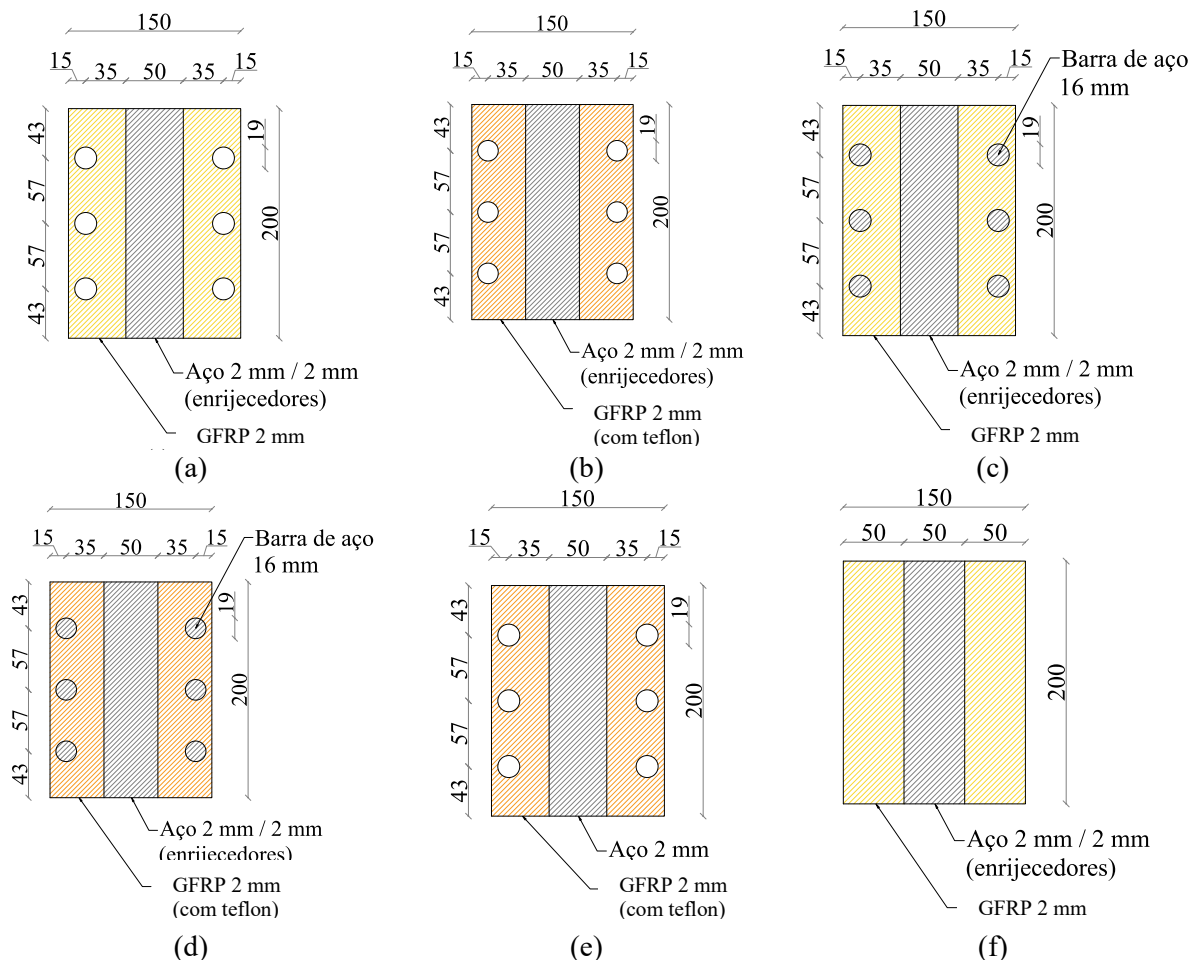


Figura 3.10 – Vista frontal dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP; (b) S2-FRP-EA; (c) S2-FRP-RH; (d) S2-FRP-EA/RH; (e) S2-A36-EA; e (f) S2-CTL, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

3.4.3 Série 3

A Série 3 teve como objetivo analisar o comportamento de conectores com diferentes espessuras na região de GFRP localizada entre camadas de concreto, por meio da aplicação de placas adicionais coladas sobre essa área, denominadas enrijecedores ou reforços. Essa investigação buscou identificar a espessura ideal capaz de prevenir a ruptura na região exposta e direcionar o colapso para a zona ancorada no concreto, promovendo um comportamento mais dúctil do conector. As placas de reforço foram produzidas a partir do mesmo lote das chapas utilizadas nos conectores, sendo coladas com a mesma resina empregada no processo de infusão original. Neste trabalho, a região do conector entre camadas de concreto foi reforçada com placas confeccionadas com o mesmo tipo de FRP utilizado na produção dos conectores, tendo-se optado por realizar esse reforço de forma posterior por questões práticas. No entanto, caso essa solução se mostre atrativa para induzir a ruptura de forma mais dúctil na parte do conector inserida no concreto, é possível produzir conectores com maior espessura diretamente na região central, apenas aumentando a gramatura de fibras nessa área, o que dispensaria a necessidade da etapa adicional de reforço.

Na Série 3, adotou-se a mesma configuração geométrica da Série 2, com diâmetro dos furos de 19 mm e espaçamentos idênticos, a fim de manter a coerência entre os ensaios e isolar o efeito da variável investigada. A nomenclatura utilizada para identificação dos conectores seguiu o formato “S₃ – t_r – r”, em que t_r representa a espessura do reforço aplicado na região exposta (em milímetros) e r identifica a réplica por meio das letras A, B ou C. Com base nessa convenção, foi elaborada a Tabela 3.4, que organiza e apresenta de forma sistemática todos os conectores testados na Série 3.

Tabela 3.4 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 3.

Código de identificação	Espessura do reforço do conector na região exposta de GFRP [mm]	Qtd. de réplicas
S3-0	0	3
S3-2	2	3
S3-4	4	3
S3-6	6	3
S3-8	8	3
Total		15

A Figura 3.11a apresenta a vista frontal dos conectores da Série 3, a qual é idêntica para todos os modelos testados e, por esse motivo, foi representada apenas uma vez. Da Figura 3.11b à Figura 3.11f, são apresentadas as vistas superiores de cada conector, com destaque para

a configuração dos enrijecedores aplicados nas regiões de GFRP na região entre camadas de concreto.

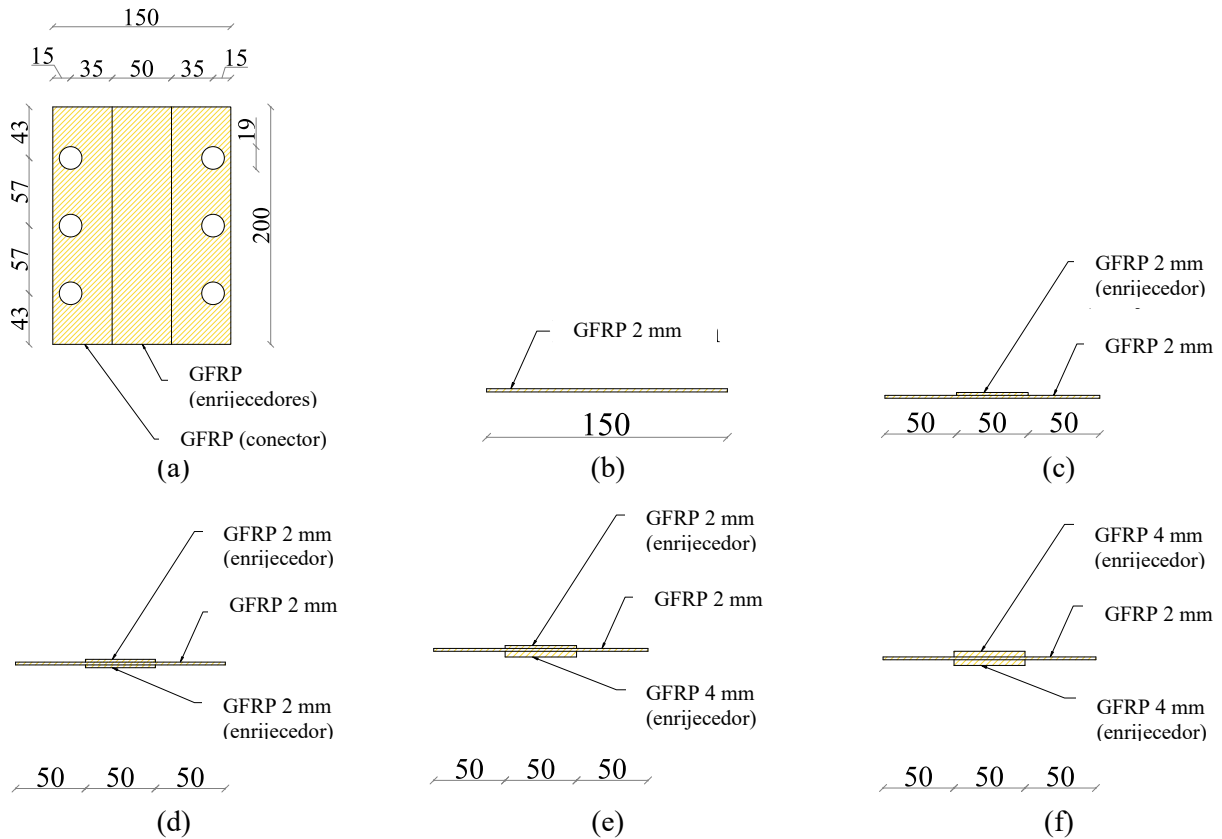


Figura 3.11 – Conectores da Série 3: (a) vista frontal conectores; e vistas superiores dos modelos (b) S3-0; (c) S3-2; (d) S3-4; (e) S3-6; e (f) S3-8, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

3.4.4 Série 4

Na Série 4, adotou-se uma configuração geométrica distinta das séries anteriores, com variações tanto no diâmetro quanto na quantidade de furos nos conectores. Foram utilizados diâmetros de 12 mm, 16 mm e 19 mm, combinados com configurações contendo 1, 2 ou 3 furos por conector. Essas combinações permitiram avaliar de forma isolada o efeito do diâmetro do furo e da quantidade de furos sobre a resistência ao cisalhamento, a rigidez e a ductilidade dos conectores, aprofundando a compreensão dos mecanismos que governam seu desempenho estrutural. Embora essas variáveis tenham sido modificadas, manteve-se fixo o espaçamento relativo entre os furos e entre os furos e a borda interna do conector, uma vez que essa característica não foi objeto de investigação nesta série. Essa estratégia visou preservar a coerência geométrica das configurações, assegurando que os efeitos observados fossem atribuídos exclusivamente às variáveis estudadas. O espaçamento relativo corresponde à razão

entre o espaçamento absoluto (entre furos ou entre furos e a borda) e o respectivo diâmetro do furo.

Com base nessas configurações geométricas e variáveis adotadas, a expressão “ $S_4 - D_h - n_h - r$ ” estabelece o sistema de identificação dos conectores da Série 4, em que D_h refere-se ao diâmetro dos furos em milímetros e n_h indica a quantidade de furos presentes em cada região de GFRP ancorado. Adicionalmente, cada réplica (r) é diferenciada pelas letras A, B ou C. Seguindo a nomenclatura padronizada para identificação das amostras, foi criada a Tabela 3.5, que apresenta de forma sistemática a identificação de todos os conectores testados.

Tabela 3.5 – Identificação dos códigos atribuídos aos conectores da Série 4.

Código de identificação	Diâmetro dos furos [mm]	Qtd. de furos	Qtd. de réplicas
S4-19-1	19,05	1	3
S4-19-2	19,05	2	3
S4-16-3	15,88	3	3
S4-13-3	12,70	3	3
Total			12

Complementando a identificação apresentada na Tabela 3.5, a Figura 3.12a exibe a vista superior comum a todos os conectores da Série 4, ilustrada apenas uma vez por se tratar de uma geometria idêntica entre os modelos. Da Figura 3.12b à Figura 3.12e, são apresentadas as vistas frontais dos conectores, destacando as variações no diâmetro e na quantidade de furos de cada configuração testada.

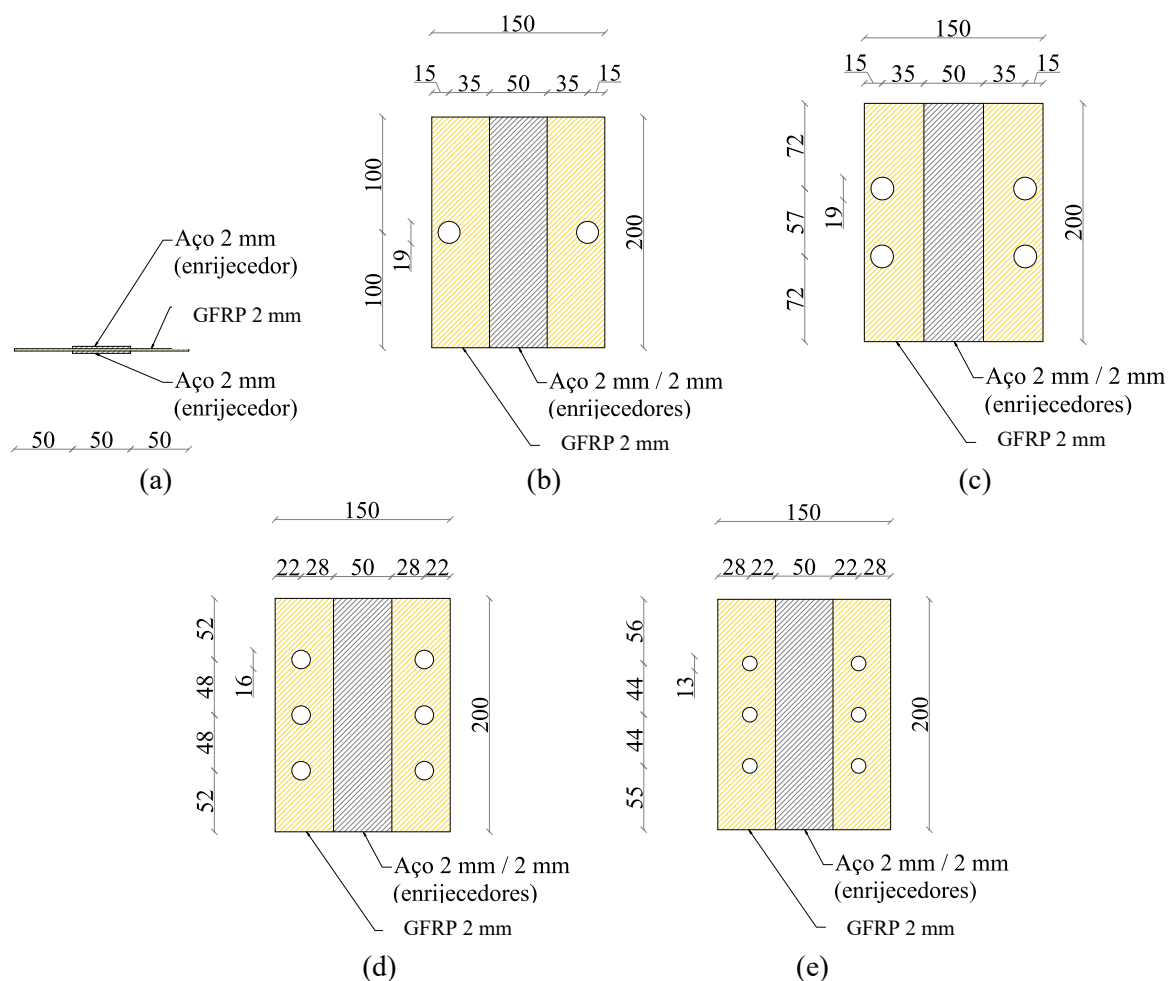


Figura 3.12 – Conectores da Série 4: (a) vista superior; e vistas frontais de diferentes modelos: (b) S4-19-1; (c) S4-19-2; (d) S4-16-3; e (e) S4-13-3, com as medidas apresentadas em milímetros [mm].

3.5 Processamento dos dados

O processamento dos dados obtidos nos ensaios experimentais seguiu um procedimento padronizado para todas as séries, utilizando a mesma abordagem para a extração, o tratamento e a interpretação dos resultados, a fim de garantir a compatibilidade entre os diferentes conjuntos analisados. Ajustes pontuais foram realizados quando necessário, considerando as particularidades de cada conjunto experimental. Quando essas adaptações se fizeram necessárias, foram devidamente descritas e discutidas na apresentação dos resultados de cada série.

3.5.1 Padrões de fissuração

A análise dos padrões de fissuração foi realizada com base no registro visual dos conectores, extraídos dos corpos de prova após os ensaios experimentais e documentada por meio de imagens para a identificação dos modos de falha predominantes em cada série. Cada corpo de prova continha dois conectores e, considerando que o ensaio *push-out* gera um

comportamento espelhado entre as metades, apenas um deles foi extraído para análise, visando otimizar o trabalho sem comprometer a representatividade dos resultados. Esse procedimento permitiu avaliar a distribuição e a propagação das fissuras, facilitando a comparação entre as diferentes configurações de conectores. A metodologia adotada seguiu as seguintes etapas:

- a) registro fotográfico logo após a extração dos conectores, evitando alterações nas fissuras devido ao manuseio dos corpos de prova;
- b) importação e ajuste de escala das imagens em *software* de desenho auxiliado por computador;
- c) classificação dos modos de falha, considerando os mecanismos predominantes, como ruptura do GFRP na região entre camadas de concreto, ruptura do GFRP ancorado no concreto e fratura nos pinos de concreto;
- d) cálculo da extensão total das fissuras, por meio da soma das medições realizadas no *software*;
- e) comparação entre diferentes configurações de conectores, analisando a influência da geometria na propagação das fissuras.

3.5.2 Carregamento *versus* deslizamento relativo

Para avaliar o comportamento força versus deslizamento relativo entre as camadas de concreto, as curvas foram inicialmente construídas com base na média dos deslocamentos medidos pelos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), conforme exemplificado na Figura 3.13a. Em seguida, com as curvas médias obtidas para cada réplica, foi gerada uma curva média representativa de cada configuração de corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 3.13b. Esse procedimento consistiu no cálculo da média das forças correspondentes a cada valor de deslizamento ao longo de toda a extensão do grupo de réplicas analisado, por conector.

Conforme abordado no tópico 3.2.2, os deslizamentos foram medidos por meio de um sistema *poka-yoke*, utilizando dois LVDTs, um posicionado em cada face do corpo de prova. Esse sistema permite quantificar o deslizamento relativo entre as camadas de concreto, considerando tanto o movimento do GFRP dentro do concreto quanto a deformação do próprio conector. Dessa forma, o valor registrado reflete não apenas o deslizamento em si do GFRP no concreto, mas também a deformação do material polimérico. No entanto, para fins de simplificação terminológica ao longo deste trabalho, esse fenômeno será referido apenas como deslizamento.

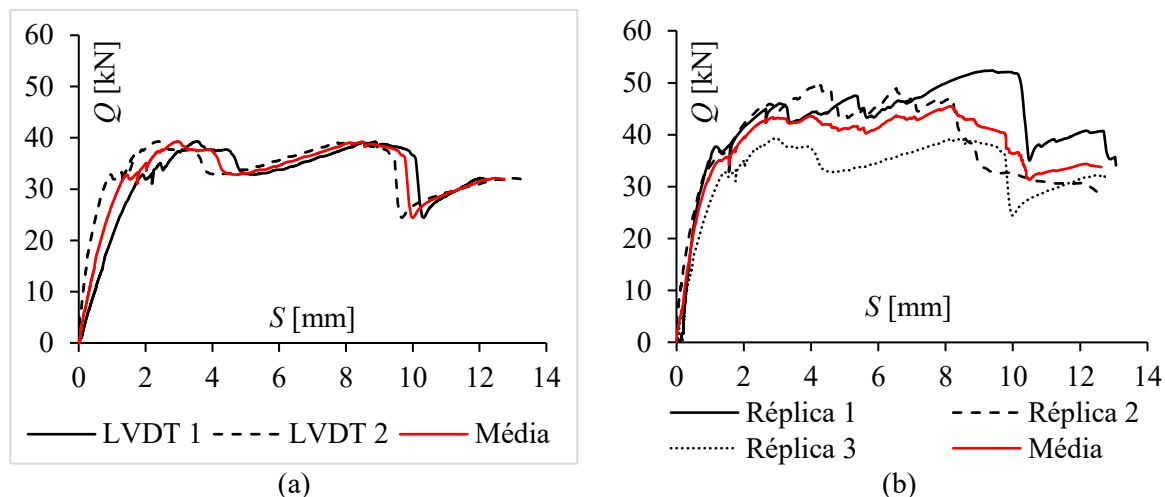


Figura 3.13 – Comportamento força *versus* deslocamento relativo: (a) exemplo de curva média dos deslocamentos medidos em uma réplica; e (b) exemplo de curva média das réplicas para uma configuração de corpo de prova.

3.5.3 Parâmetros mecânicos

Com base nas curvas obtidas para cada réplica, conforme ilustrado na Figura 3.13a no tópico 3.5.2, foram determinados diversos parâmetros mecânicos, incluindo a capacidade última, o deslocamento na capacidade última, a rigidez inicial e a energia absorvida. As definições de cada parâmetro são apresentadas a seguir:

- capacidade última ($Q_{lo,u}$): determinada pelo ponto de força máxima na curva força *versus* deslocamento relativo, sendo utilizada para quantificar a resistência máxima dos conectores sob cisalhamento;
- deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$): correspondente ao deslocamento registrado no instante da força máxima, permitindo a avaliação da deformabilidade dos conectores antes do início da perda de resistência;
- rigidez inicial (K_f): calculada a partir do ponto correspondente a 70% da capacidade última e seu respectivo deslocamento, sendo utilizada para caracterizar a resistência inicial dos conectores ao deslocamento;
- energia absoluta absorvida (W_{abs}): determinada pela área sob a curva força *versus* deslocamento relativo até o fim do ensaio, servindo como indicador da capacidade dos conectores de dissipar energia durante a aplicação da força;
- energia relativa absorvida (W_{rel}): calculada pela razão entre a área sob a curva força-deslocamento e o valor da força máxima correspondente ao mesmo conector, representa uma medida da capacidade de dissipação de energia por unidade de força resistente, permitindo comparar a ductilidade

entre diferentes configurações de conectores, independentemente da resistência absoluta alcançada.

3.5.4 Avaliação da ductilidade

Todas as curvas geradas conforme ilustrado na Figura 3.13b foram modeladas individualmente e classificadas quanto à ductilidade, de acordo com os critérios estabelecidos na revisão da norma prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024). A classificação foi realizada nas categorias D3, D2 e D1 (conforme exemplificado na Figura 3.14a, na Figura 3.14b e na Figura 3.14c, respectivamente) indicando, em ordem decrescente, os níveis de ductilidade dos conectores, desde os mais dúcteis até os mais frágeis. A força característica (P_{Rk}) foi definida como 90% da capacidade última (P_e), enquanto a rigidez associada (K_{sc}) foi obtida pela razão entre P_{Rk} e o deslizamento relativo correspondente (δ_{ek}).

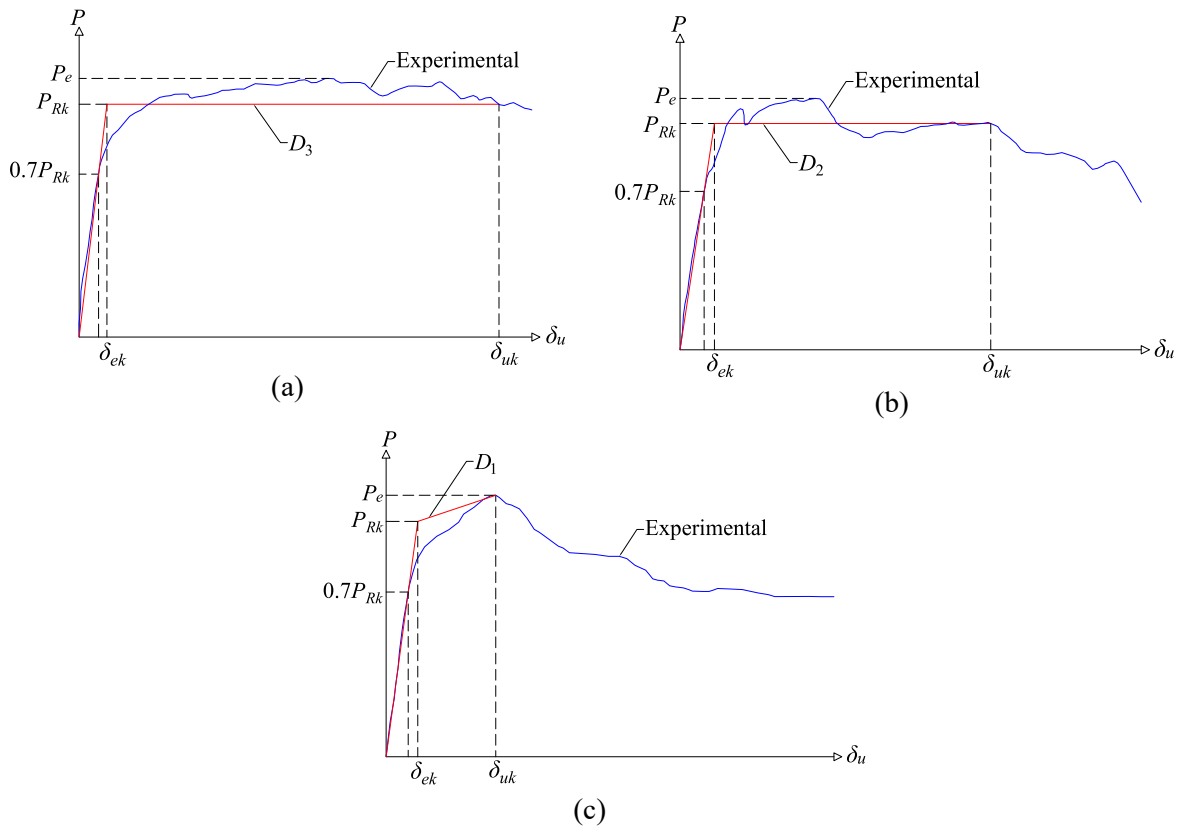


Figura 3.14 – Classificação das curvas conforme categoria de ductilidade: (a) D3, (b) D2 e (c) D1.

Na sequência, o Quadro 3.1 apresenta os critérios objetivos estabelecidos pela norma prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024) para a classificação das curvas em diferentes categorias de ductilidade.

Quadro 3.1 – Critérios para classificação dos conectores com base na ductilidade, conforme prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024).

Classificação da ductilidade	Deslizamento relativo na resistência característica	Deslizamento relativo na capacidade última	Descrição do comportamento
D1	–	–	Frágil
D2	$\delta_{ek} \leq 2,5 \text{ mm}$	$6,0 \text{ mm} \leq \delta_{uk} < 10,0 \text{ mm}$	Dúctil, com capacidade de deformação suficiente para exibir um comportamento elasto-plástico, permitindo que a curva força-deslocamento alcance duas vezes a resistência caracterizada por P_{Rk} , uma vez no ramo crescente e novamente após a ruptura, com $\delta_{uk} \geq 6,0 \text{ mm}$
D3	$\delta_{ek} \leq 2,5 \text{ mm}$	$\delta_{uk} \geq 10,0 \text{ mm}$	Dúctil, com as mesmas características de D2, porém apresentando $\delta_{uk} \geq 10,0 \text{ mm}$

3.5.5 Análise estatística

Nos conjuntos de dados com número adequado de réplicas e relevância para os objetivos do estudo, buscou-se complementar a análise técnica com ferramentas estatísticas que auxiliassem na interpretação dos resultados. Para isso, foram elaborados diagramas de caixa (*box plots*), com o intuito de identificar diferenças potencialmente significativas entre as médias dos grupos avaliados.

A análise estatística foi realizada por meio da Análise de Variância, também conhecida pelo termo em inglês *Analysis of Variance* (ANOVA), conforme a metodologia apresentada por Werkema, Drumond e Aguiar (1996), adotando-se um nível de significância de $\alpha = 5,0\%$. Esse procedimento permitiu verificar a influência estatística das variáveis testadas sobre os parâmetros mecânicos analisados, oferecendo suporte quantitativo às comparações realizadas no programa experimental.

Para tanto, considerou-se n_i como o número de observações no i -ésimo tratamento ($i = 1, 2, 3, \dots, k$); e $N = \sum_{i=1}^k n_i$ como o número total de observações. Com base nisso, as somas dos quadrados total (S_{QT}), entre tratamentos (S_{QE}) e residual (S_{QR}) foram calculadas, respectivamente, utilizando as Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$S_{QT} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \right)^2}{N} \quad 3.1$$

$$S_{QE} = \sum_{i=1}^k \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \right)^2}{n_i} - \frac{\left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \right)^2}{N} \quad 3.2$$

$$S_{QR} = S_{QT} - S_{QE} \quad 3.3$$

Os graus de liberdade para S_{QT} , S_{QE} e S_{QR} foram determinados como $N - 1$, $k - 1$ e $N - k$, respectivamente. Em seguida, o quadrado médio entre tratamentos (Q_{ME}), o quadrado médio residual (Q_{MR}) e o valor de F_0 foram calculados utilizando as Equações 3.4, 3.5 e 3.6, respectivamente.

$$Q_{ME} = \frac{S_{QE}}{k - 1} \quad 3.4$$

$$Q_{MR} = \frac{S_{QR}}{N - k} \quad 3.5$$

$$F_0 = \frac{Q_{ME}}{Q_{MR}} \quad 3.6$$

Para calcular o valor da Distribuição F ao nível de significância de $\alpha = 5,0 \%$, com os graus de liberdade (f) do numerador sendo $k - 1$ e do denominador sendo $N - k$, utilizou-se a função “=INV.F.CD(α ; $k - 1$; $N - k$)” do *Microsoft Excel*®. Finalmente, quando F_0 for superior a $F_{5\%}$, conclui-se que há uma diferença estatisticamente significativa entre as médias, aceitando-se, assim, a Hipótese Alternativa (H_1); caso contrário, mantém-se a Hipótese Nula (H_0).

Uma vez confirmada a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as médias ($F_0 > F_{5\%}$), procedeu-se com uma análise complementar para identificar quais médias apresentavam distinções significativas entre si. Para essa finalidade, aplicou-se o Teste de Duncan, conforme descrito por Werkema, Drumond e Aguiar (1996), utilizando-se um nível de significância de 5%. Os parâmetros n_h (média ponderada de réplicas por grupo), $S_{\bar{x}_i}$ (erro padrão da média) e R_p (diferença mínima significativa), necessários para a execução do teste, foram calculados conforme as Equações 3.7, 3.8 e 3.9:

$$n_h = \frac{k}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i}} = \frac{3}{\frac{1}{8} + \frac{1}{7} + \frac{1}{7}} = 7,30 \quad 3.7$$

$$S_{\bar{x}_i} = \sqrt{\frac{Q_{MR}}{n_h}} \quad 3.8$$

$$R_p = V_\alpha S_{\bar{x}_i} \quad 3.9$$

O valor de $V_\alpha(p, f)$, denominado *Studentized range statistic*, é obtido em tabelas específicas do Teste de Duncan. Nesse contexto, f representa o número de graus de liberdade do denominador (residual), e p corresponde ao número de médias envolvidas em cada comparação, variando de $p = 2$ até $p = k$. As médias $\bar{x}_{(i)}$ são organizadas em ordem crescente e, inicialmente, compara-se a diferença entre a maior e a menor média com o valor de R_p . Em seguida, a maior média é comparada com a segunda menor, depois com a terceira menor, e assim sucessivamente, até que todas as combinações relevantes sejam analisadas. Considera-se que dois grupos apresentam diferença estatisticamente significativa (hipótese H1) quando a diferença observada entre suas médias excede o valor de R_p correspondente.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos na investigação experimental realizada. Inicialmente, são descritas as propriedades dos materiais empregados na pesquisa, com a caracterização do concreto, do GFRP e do aço. Em seguida, são discutidos os ensaios de cisalhamento duplo conduzidos em quatro séries distintas de conectores, contemplando diferentes geometrias e condições de interação com o concreto. Para cada série, são analisados os padrões de fissuração, as curvas força–deslizamento, os parâmetros mecânicos derivados e, quando aplicável, os aspectos de ductilidade.

4.1 Caracterização dos materiais

No presente tópico são discutidos o controle tecnológico e as propriedades dos materiais empregados nos ensaios, incluindo concreto, aço e GFRP. A caracterização desses materiais foi realizada em conformidade com normas técnicas, visando garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados experimentais.

A Figura 4.1 ilustra as etapas de caracterização dos materiais, apresentando o ensaio de tração para determinação da resistência e do módulo de elasticidade do GFRP (partes a e b). Em seguida, exibe o ensaio de compressão e a obtenção do módulo de elasticidade do concreto (parte c), bem como o ensaio de tração por compressão diametral no concreto (parte d).

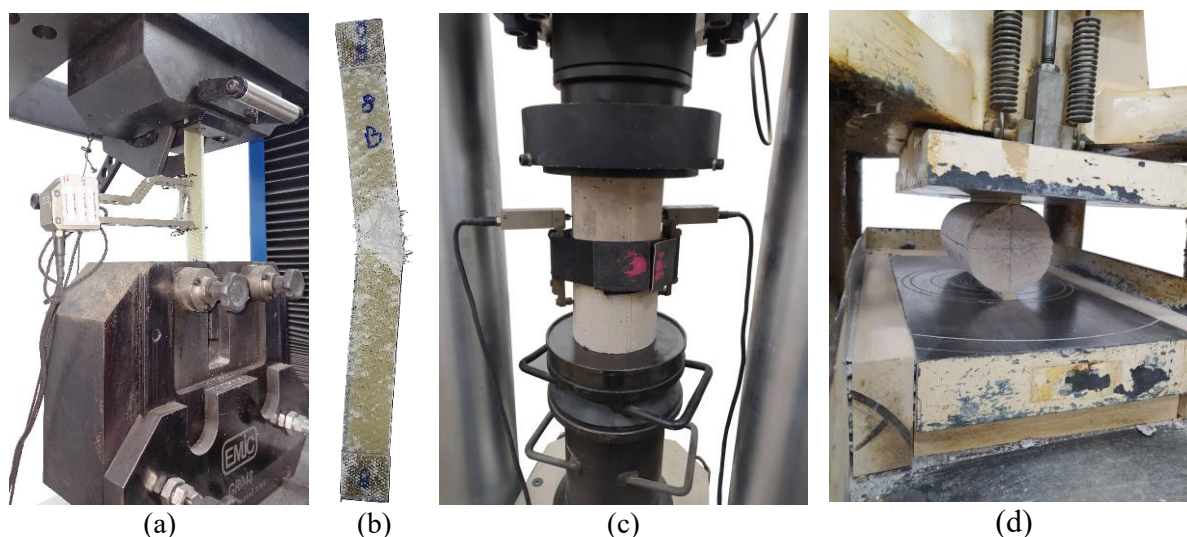


Figura 4.1 – Caracterização dos materiais: (a) ensaio de tração e determinação do módulo de elasticidade do GFRP; (b) corpo de prova de GFRP rompido à tração; (c) ensaio de compressão e obtenção do módulo de elasticidade do concreto; e (d) ensaio de tração por compressão diametral no concreto.

4.1.1 Concreto

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da caracterização mecânica dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4, considerando resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. O concreto da Série 1 exibe uma resistência média à compressão de 43,25 MPa, uma resistência à tração diametral de 4,60 MPa e um módulo de elasticidade de 31,37 GPa. Para as Séries 2, 3 e 4, que foram produzidas a partir de uma mesma betonada, os valores médios de resistência à compressão são de 38,57 MPa, resistência à tração de 4,09 MPa e módulo de elasticidade de 26,71 GPa. Todas as séries apresentaram desvio padrão e erro percentual relativamente baixos, indicando consistência nas propriedades mecânicas. Os resultados completos, incluindo todos os corpos de prova, estão disponíveis no “Apêndice A: resultados completos de caracterização dos materiais”.

Tabela 4.1 – Resultados da caracterização mecânica dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Série	Resistência à compressão			Resistência à tração			Módulo de elasticidade		
	$\bar{x}$ [MPa]	s_d [MPa]	c_v [%]	$\bar{x}$ [MPa]	s_d [MPa]	c_v [%]	$\bar{x}$ [GPa]	s_d [GPa]	c_v [%]
1	43,25	0,65	1,49	4,60	0,26	5,58	31,37	1,63	5,20
2, 3 e 4	38,57	2,93	7,59	4,69	0,21	4,51	26,71	0,44	1,66

4.1.2 GFRP

Para o GFRP, foi conduzido um ensaio de tração para determinar sua resistência e módulo de elasticidade, conforme norma ASTM D3039/D3039M-17 (2017). Esse material exibe um comportamento caracterizado por uma fase linear elástica seguida de uma ruptura abrupta. Na **Série 1**, o GFRP apresentou espessura de **3,87 mm** (dez camadas de CSM), enquanto nas **Séries 2, 3 e 4**, a espessura foi de **2,00 mm** (cinco camadas de CSM). O módulo de elasticidade da Série 1 foi calculado com base nas medições de deformação realizadas até aproximadamente 0,006 mm/mm, valor correspondente ao ponto, cuja força alcança o valor de cerca de 50% da capacidade última. Já nas Série 2 a 4, o cálculo do módulo não pôde ser realizado por problemas no dispositivo de medição. Por se tratar de um material com propriedades previsíveis, conforme indicado pelos resultados de Lameiras (2015), que se mostraram próximos aos valores de resistência à tração das Séries 1 a 4 e ao módulo de elasticidade da Série 1, considera-se razoável estimar o módulo de elasticidade das Séries 2 a 4 com base nos resultados obtidos para a Série 1.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da caracterização mecânica dos GFRPs utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4, incluindo resistência à tração e módulo de elasticidade. Na

Série 1, o GFRP apresenta uma resistência média à tração de 203,8 MPa, com um desvio padrão de 20,1 MPa e coeficiente de variação 9,9%. O módulo de elasticidade médio para essa série é de 14,90 GPa, com desvio-padrão de 0,97 GPa e coeficiente de variação de 6,5%.

Nas Séries 2, 3 e 4, que foram produzidas com o mesmo lote de GFRP, a resistência média à tração foi de 195,4 MPa, com desvio-padrão de 24,2 MPa e erro percentual de 12,4%. O módulo de elasticidade para essas séries não foi calculado devido a problemas com o dispositivo de medição de deformações. Os resultados individuais de cada corpo de prova estão detalhados no “Apêndice A: resultados completos de caracterização dos materiais”.

Tabela 4.2 – Resultados da caracterização mecânica dos GFRPs utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Série	Resistência à tração			Módulo de elasticidade		
	$\bar{x}$ [MPa]	s_d [MPa]	c_v [%]	$\bar{x}$ [GPa]	s_d [GPa]	c_v [%]
1	203,8	20,1	9,9	14,9	0,97	6,5
2, 3 e 4	195,4	24,2	12,4	–	–	–

A Figura 4.2 apresenta o comportamento médio de força *versus* deformação para o GFRP utilizado na Série 1. A curva ilustra uma fase inicial elástica linear, com medições de deformação realizadas até aproximadamente 0,006 mm/mm, o que representa, conforme já mencionado, cerca de metade da resistência última do compósito. A ruptura ocorreu posteriormente, após a remoção do dispositivo de medição de deformações, impossibilitando a determinação precisa da deformação no ponto de ruptura. No entanto, supõe-se que o material mantenha um comportamento linear até a ruptura, devido às suas propriedades frágeis e rígidas, características dos compósitos como o GFRP. Todas as curvas individuais que compõem a média estão disponíveis no “Apêndice A: resultados completos de caracterização dos materiais”.

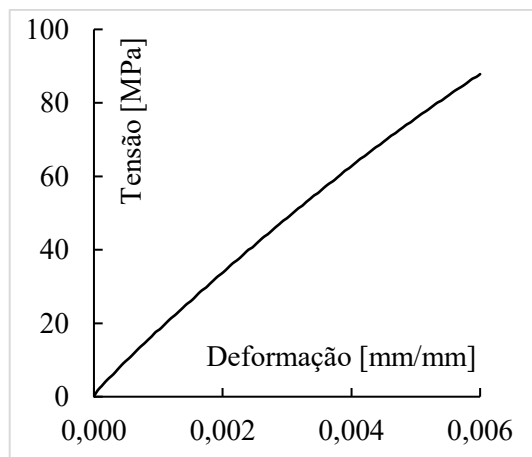


Figura 4.2 – Comportamento médio força versus deformação do GFRP utilizado na Série 1.

4.1.3 Aço (armaduras ou vergalhões)

Para o aço (armaduras ou vergalhões) utilizado nos corpos de prova, o ensaio de tração foi realizado de acordo com a norma ISO 15630-1 (2019), que especifica os procedimentos para ensaios de vergalhões. Foram determinados valores específicos de escoamento e ruptura, com medições feitas em barras de diferentes diâmetros (8,0 mm e 10,0 mm), visando uma caracterização precisa do material.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da caracterização mecânica do aço utilizado em todas as séries experimentais deste trabalho, motivo pelo qual foi realizada uma única caracterização. Os dados incluem o módulo de elasticidade, limite de escoamento e resistência à ruptura para barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro. Para as barras de 8,0 mm, o módulo de elasticidade médio foi de 213.459 MPa, o limite de escoamento de 638,1 MPa e a resistência à ruptura de 749,4 MPa. Já nas barras de 10,0 mm, o módulo de elasticidade foi de 237.367 MPa, o limite de escoamento de 676,0 MPa e a resistência à ruptura de 796,9 MPa. Os valores individuais de cada amostra estão detalhados no “Apêndice A: resultados completos de caracterização dos materiais”.

Tabela 4.3 – Resultados da caracterização mecânica do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Barra [mm]	Módulo de elasticidade			Tensão de escoamento			Tensão de ruptura		
	$\bar{x}$ [GPa]	s_d [GPa]	c_v [%]	$\bar{x}$ [MPa]	s_d [MPa]	c_v [%]	$\bar{x}$ [MPa]	s_d [MPa]	c_v [%]
8,0	213,46	6,60	3,1	638,1	14,0	2,2	749,4	15,1	2,0
10,0	237,37	21,44	9,0	676,0	7,4	1,1	796,9	7,3	0,9

A Figura 4.3 apresenta o comportamento de força *versus* deformação do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4. A imagem está dividida em duas partes: (a) mostra as curvas

para as barras de 8,0 mm de diâmetro, enquanto (b) apresenta as curvas para as barras de 10,0 mm. As curvas ilustram o comportamento elástico-linear típico do aço, seguido pela fase de escoamento até a ruptura.

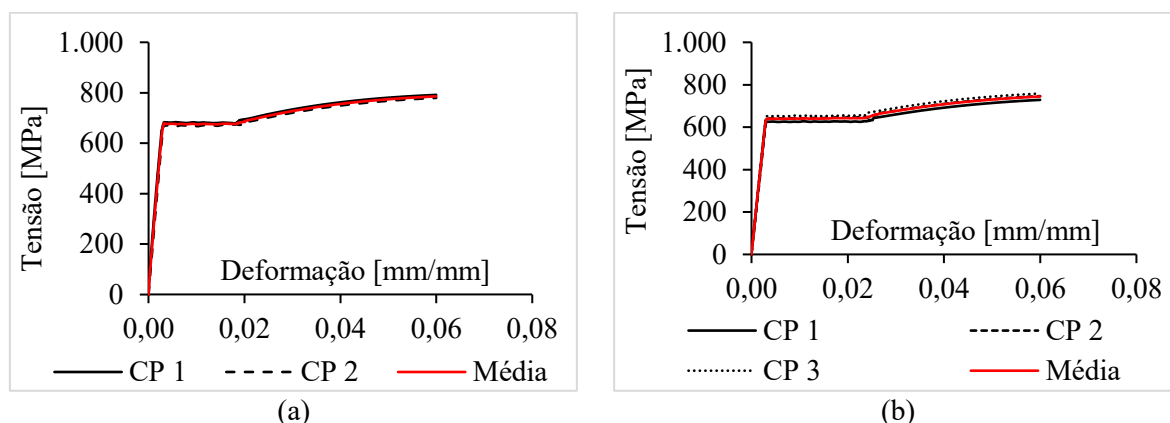


Figura 4.3 – Comportamento carregamento *versus* deformação do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4: (a) barras de 8,0 mm; e (b) barras de 10,0 mm.

4.2 Série 1: avaliação do efeito da disposição dos furos no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

O tópico 4.2 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento duplo da Série 1, com foco na influência da disposição dos furos sobre o comportamento mecânico dos conectores PERFOFRP. São abordados os padrões de fissuração, as curvas força-deslizamento e os principais parâmetros extraídos, como capacidade última, deslocamento e rigidez. As curvas força-deslizamento servem de base para a classificação da ductilidade dos conectores, segundo critérios da prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024). Por fim, é realizada uma análise estatística que inclui comparação de médias e interpretação das variações entre os grupos testados.

Os resultados da Série 1 são válidos para conectores PERFOFRP confeccionados com laminado GFRP de dez camadas (espessura média de 3,87 mm) e perfurações de diâmetro fixo de 19 mm, avaliados em combinações geométricas com espaçamentos entre furos Sh de 30, 40 e 57 mm e distâncias entre furo e borda interna Sb de 15, 25 e 35 mm. Além disso, a interpretação dos resultados está condicionada às propriedades do concreto usado na Série 1. Extrapolações para geometrias, espessuras, diâmetros de furo, classes de concreto ou condições de interface distintas dessas faixas devem ser feitas com cautela e carecem de verificação experimental adicional.

4.2.1 Padrões de fissuração

A Figura 4.4, a Figura 4.5, a Figura 4.6 e a Figura 4.7 ilustram o comportamento típico de cada tipo de conector testado. Todos os conectores apresentaram fissuras na região do GFRP ancorado no concreto, o que indica que o reforço com chapas de aço foi eficaz em evitar rupturas na área GFRP na região entre camadas de concreto.

A Figura 4.4 apresenta os padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1, especificamente para os modelos com espaçamento entre furos de 57 mm ($S_h = 57$ mm), variando a distância entre o furo e a borda interna do conector (S_b) entre 35 mm e 15 mm. Em todos os conectores analisados, observou-se a formação de uma fissura vertical contínua, que se estende ao longo dos furos e alcança as extremidades do conector, indicando uma trajetória preferencial de propagação das tensões de cisalhamento concentradas nas regiões de ancoragem.

Durante o processo de extração dos conectores rompidos, observou-se que, em alguns casos, o enrijecedor metálico pôde ser removido manualmente. Em outras situações, o componente metálico se desprende espontaneamente no momento da extração. No entanto, houve casos em que a remoção do enrijecedor não foi possível sem o risco de danificar a superfície do conector rompido. Nesses casos, optou-se por manter o enrijecedor fixado ao conector, de modo a preservar a integridade do conector para documentação e análise posterior.

Verifica-se, ainda, que os conectores com maiores distâncias entre o furo e a borda interna ($S_b = 35$ mm e $S_b = 25$ mm) apresentaram fissuração mais dispersa, com múltiplas fissuras laterais, evidenciando uma distribuição de tensões menos concentrada (Figura 4.4a a Figura 4.4f). Em contrapartida, esses mesmos conectores apresentaram tendência ao surgimento de fissuras adicionais entre o furo e a borda externa do conector, o que se deve à pequena distância remanescente nessa região.

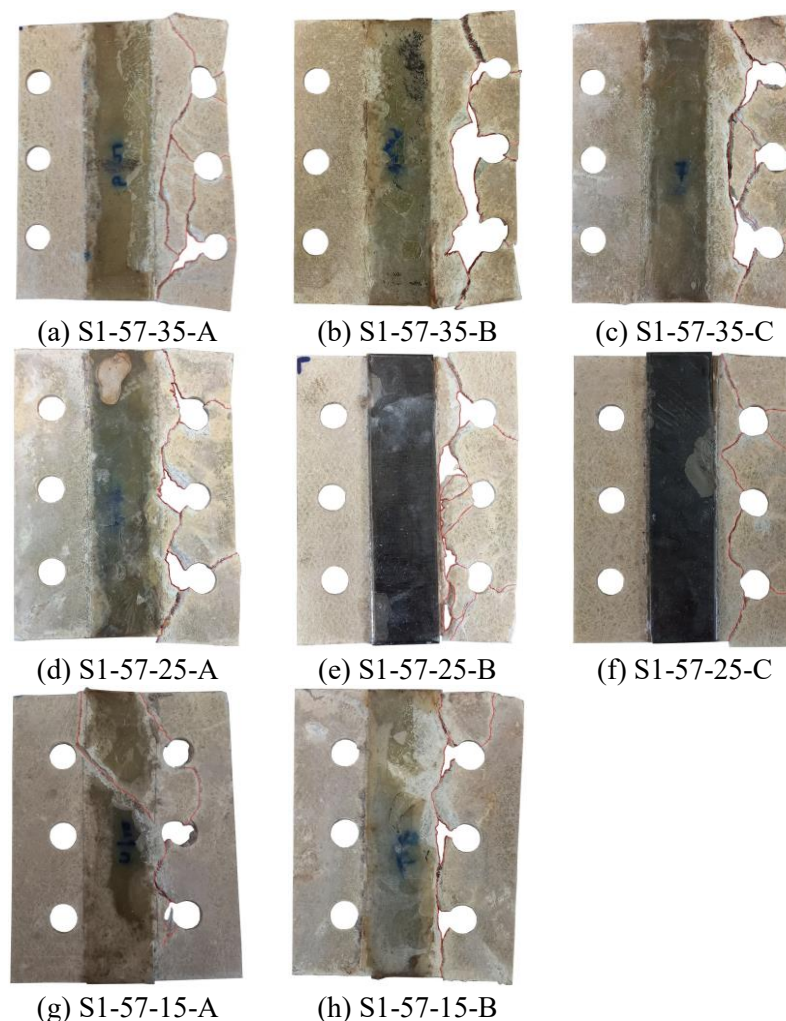


Figura 4.4 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-57-35-A; (b) S1-57-35-B; (c) S1-57-35-C; (d) S1-57-25-A; (e) S1-57-25-B; (f) S1-57-25-C; (g) S1-57-15-A; e (h) S1-57-15-B.

Uma situação excepcional foi identificada no conector S1-57-15-A, que apresentou fissuração na região de GFRP na região entre camadas de concreto, uma condição não habitual nos demais conectores da série. Essa fissura está associada ao comportamento pós-pico do conector, momento em que, devido à perda de confinamento e à redução de rigidez na interface, o conector tende a rotacionar em relação às camadas de concreto. Tal instabilidade, exacerbada pelo deslizamento relativo, promove tensões localizadas na região exposta do GFRP, favorecendo a abertura de fissuras mesmo fora da zona de ancoragem.

Em sequência, a Figura 4.5 apresenta os conectores da Série 1 com espaçamento entre furos de 40 mm ($S_h = 40$ mm), variando novamente a distância entre os furos e as bordas internas do conector (S_b) entre 35 mm e 15 mm. Tal como na Figura 4.4, foram exibidas todas as réplicas disponíveis para cada configuração de conector, organizadas em linhas para facilitar a leitura e a comparação visual dos padrões de fissuração.



Figura 4.5 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-40-35-A; (b) S1-40-35-B; (c) S1-40-35-C; (d) S1-40-25-A; (e) S1-40-15-A; (f) S1-40-15-B; e (g) S1-40-15-C.

Conforme mencionado em “3.4 Planejamento experimental”, alguns corpos de prova apresentaram falhas no processo de concretagem, o que levou ao descarte de determinadas amostras. Essa condição resultou, por exemplo, na ausência das réplicas S1-40-25-B e S1-40-25-C, cujos espaços foram mantidos vazios na imagem, com o objetivo de preservar a organização didática da disposição das amostras, alinhando as réplicas horizontalmente conforme sua configuração.

Quanto aos padrões de fissuração observados na Figura 4.5, verificou-se a presença recorrente de fissuras verticais. Diferentemente do que foi observado na Figura 4.4, em que as fissuras seguiam trajetórias predominantemente retilíneas, nesta configuração com menor espaçamento entre os furos ($S_h = 40$ mm), as fissuras apresentaram formatos curvos ou arqueados. Esse comportamento foi especialmente evidente nos conectores S1-40-35 e S1-40-25. Esse comportamento evidencia a influência direta do posicionamento dos furos na orientação das fissuras e na forma como as tensões de cisalhamento se redistribuem ao longo da região de GFRP ancorado.

Além disso, foram observadas fissuras inclinadas que se iniciam no furo mais próximo à parte superior do corpo de prova e se estendem até a borda externa dos conectores. Esse padrão foi claramente identificado nos conectores S1-40-15, e em menor proporção nos conectores S1-40-25, indicando que a maior distância entre os furos e a borda superior favorece a propagação da fissura em direção à borda lateral externa, em vez da continuidade vertical até o topo do conector. No caso do S1-40-35, foi observada uma fissura ligando o furo superior à borda externa do conector, possivelmente associada à pequena distância remanescente entre essas regiões, o que reduz a resistência local à fissuração.

A formação dessas fissuras inclinadas, mesmo quando há margem suficiente entre o furo e a borda externa, sugere a existência de um campo de tensões complexo induzido pela combinação do cisalhamento e da restrição imposta pelas camadas de concreto. A concentração de tensões ao redor dos furos próximos às bordas internas parece orientar a abertura inicial das fissuras, que, ao se desenvolverem, buscam trajetórias menos resistentes, resultando em caminhos curvos ou inclinados. Tal como observado nos conectores da Figura 4.4, aqueles com maior distância entre os furos e as bordas internas ($S_b = 35$ mm e 25 mm) apresentaram maior dispersão e quantidade de fissuras.

Em continuidade, a Figura 4.6 apresenta os conectores da Série 1 com espaçamento entre furos de 30 mm ($S_h = 30$ mm), novamente com variação da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b) de 35 mm a 15 mm. Assim como nas figuras anteriores (Figura 4.4 e Figura 4.5), os conectores foram organizados de forma a exibir as réplicas disponíveis para cada configuração, mantendo a sistemática de apresentação das imagens.

De modo geral, também foram observadas fissuras verticais nos conectores desta configuração; no entanto, essas fissuras apresentaram características particulares. A principal delas é a menor dispersão das fissuras, com predominância de um único caminho de fissuração que se destaca como trajetória principal. Essa característica é atribuída à pequena distância entre os furos, que induz fortemente a propagação da fissura em linha com os pontos enfraquecidos pelas perfurações, reduzindo assim a aleatoriedade observada em configurações com furos mais afastados.

Além da trajetória vertical principal, também foram registradas fissuras inclinadas partindo do furo superior (como no conector S1-30-15) ou inferior (casos S1-30-35-A e S1-30-25-C) e em alguns casos de ambos os extremos simultaneamente (S1-30-25-A). Essas fissuras inclinadas se direcionam geralmente à região de GFRP na região entre camadas de concreto, sugerindo um desvio de trajetória nos casos em que o deslizamento relativo entre as camadas

favorece a atuação de tensões inclinadas, possivelmente pela rotação do conector em estados avançados de deslizamento.

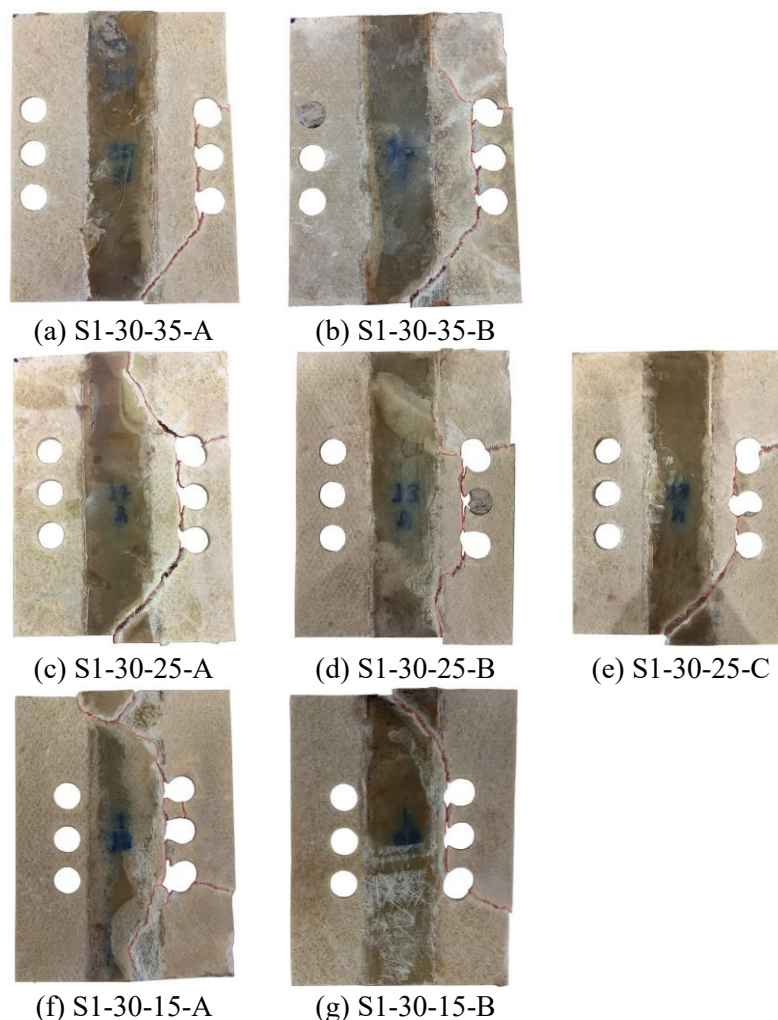


Figura 4.6 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 1: (a) S1-30-35-A; (b) S1-30-35-B; (c) S1-30-25-A; (d) S1-30-25-B; (e) S1-30-25-C; (f) S1-30-15-A; e (g) S1-30-15-B.

Adicionalmente, observou-se a presença de fissuras horizontais ou quase horizontais, que se estendem da posição dos furos (sejam superiores ou inferiores, mas não centrais) em direção à borda externa dos conectores. Exemplos desse comportamento são notados nos conectores S1-30-35 e S1-30-25, a partir dos furos superiores, e no conector S1-30-15, a partir do furo inferior. Essas fissuras transversais indicam um mecanismo de alívio de tensões associado à interação entre o conector e o concreto próximo à interface lateral.

Tal como verificado na Figura 4.4 e na Figura 4.5, as fissuras foram restritas ao lado direito dos conectores, o lado sobre o qual foi aplicado o carregamento durante os ensaios. O lado esquerdo, correspondente ao apoio dos corpos de prova, não apresentou fissuração visível. Cabe lembrar que, conforme detalhado no planejamento experimental, apenas um dos

conectores de cada corpo de prova foi extraído, uma vez que a simetria dos modelos (espelhamento) permitia assumir comportamentos semelhantes entre os dois lados, otimizando o processo de extração e análise.

Outro aspecto observado na Figura 4.6 foi a presença de resquícios de concreto aderido aos furos, mesmo após a extração dos conectores. Esse fenômeno foi identificado no conector S1-30-25-B, que apresentou concreto remanescente no furo central do lado carregado (direito). A persistência do concreto nessa região sugere que, embora o mecanismo resistente tenha sido mobilizado, não ocorreu a completa ruptura do concreto dentro dos furos, evidenciando a capacidade de ancoragem do sistema mesmo após o pico de carga.

Fenômeno semelhante foi identificado em conectores da Figura 4.5, como os modelos S1-40-35-C, S1-40-15-B e S1-40-15-C; contudo, nesses casos, os resíduos de concreto foram observados no lado esquerdo (não carregado), o que indica que tais regiões não foram plenamente solicitadas ao ponto de ruptura. Essa comparação reforça a hipótese de que os conectores, com menor espaçamento entre os furos (30 mm), podem ter promovido maior integridade do concreto nas regiões de ancoragem, além de controlarem melhor a dispersão das fissuras, devido à influência geométrica mais restritiva sobre seus caminhos de propagação.

Em sequência, a Figura 4.7 apresenta os conectores do grupo controle da Série 1, identificados como S1-CTL, os quais se diferenciam das demais configurações por não possuírem furos em sua superfície. Em todos os exemplares analisados, não foram observadas fissuras estruturais ao longo do conector. O que se verificou foram apenas ranhuras superficiais localizadas na interface entre o GFRP e o concreto.

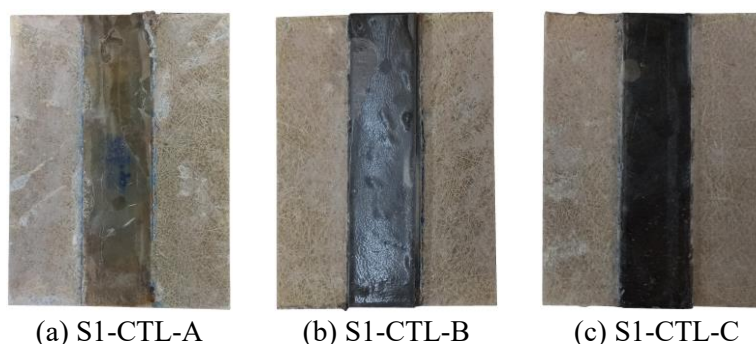


Figura 4.7 – Aspecto dos conectores após os ensaios de cisalhamento duplo: (a) S1-CTL-A; (b) S1-CTL-B; e (c) S1-CTL-C.

No conector S1-CTL-A, o enrijecedor metálico foi removido após o ensaio, enquanto nos demais (S1-CTL-B e S1-CTL-C) o enrijecedor foi mantido fixado ao conector, de modo a evitar danos à peça durante o processo de extração. A partir da análise exemplar S1-

CTL-A, foi possível identificar uma mudança nítida de coloração e textura superficial entre as duas regiões do GFRP: a área que esteve em contato com o concreto (região ancorada) e a área em contato com o enrijecedor metálico (região não ancorada). A região ancorada apresenta coloração mais clara, mesmo após a limpeza superficial realizada para remoção de resíduos de concreto, enquanto a região protegida pelo enrijecedor metálico apresenta coloração mais escura e aspecto superficial mais íntegro.

Ainda que parte desse escurecimento possa ser atribuída à presença da resina utilizada na fixação do enrijecedor, a comparação visual com a Figura 3.2a, que mostra uma chapa de GFRP recém-fabricada, permite constatar que a coloração original da chapa é, de fato, mais escura e semelhante à da região não ancorada. Isso leva a hipótese de que houve alteração da superfície do GFRP na região em contato com o concreto, possivelmente devido a dois mecanismos: (i) ação mecânica de desgaste provocada pelo atrito gerado pelo deslizamento relativo entre o conector e o concreto durante os ensaios, contribuindo para a resistência do sistema; e (ii) possível interação química entre os constituintes do concreto e a superfície da matriz polimérica do GFRP, que poderia ter provocado alterações visuais no material.

Embora a hipótese de uma reação química seja plausível, sua confirmação demanda estudos adicionais, com abordagem voltada à caracterização microestrutural e análise da interface entre os materiais. A alteração visual observada, no entanto, já aponta para interações relevantes entre o GFRP e o concreto, que vão além da aderência mecânica e devem ser consideradas em análises mais profundas sobre o desempenho desses conectores.

Em continuidade, a contabilização das fissuras está detalhada na Tabela 4.4, a qual apresenta os valores individuais de extensão das fissuras para cada espécime (x_n), bem como os parâmetros estatísticos correspondentes: média ($\bar{x}$), desvio-padrão amostral (s_d) e coeficiente de variação (c_v). Os valores observados variaram entre 15,5 cm e 55,1 cm, resultando em uma média de 31,3 cm, desvio-padrão de 11,43 cm e coeficiente de variação de 36,56%. Ressalta-se que os conectores do grupo controle, por não apresentarem fissuras visíveis, foram excluídos dessa análise.

Tabela 4.4 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) por configuração de conector.

Código	x_n [cm]	$\bar{x}$ [cm]	s_d [cm]	c_v [%]
S1-57-35-1	39,7	42,2	3,1	7,2
S1-57-35-2	41,3			
S1-57-35-3	45,6			
S1-57-25-1	36,7	40,3	13,4	33,3
S1-57-25-2	55,1			

Código	x_n [cm]	$\bar{x}$ [cm]	s_d [cm]	c_v [%]
S1-57-25-3	29,0			
S1-57-15-1	30,8	32,6	2,5	7,8
S1-57-15-2	34,4			
S1-40-35-1	55,0			
S1-40-35-2	28,3	36,4	16,1	44,2
S1-40-35-3	26,0			
S1-40-25-1	38,0	38,0	–	–
S1-40-15-1	31,5			
S1-40-15-2	20,4	24,2	6,4	26,3
S1-40-15-3	20,6			
S1-30-35-1	15,5	18,7	4,5	24,2
S1-30-35-2	21,9			
S1-30-25-1	27,0			
S1-30-25-2	21,2	21,6	5,2	23,9
S1-30-25-3	16,7			
S1-30-15-1	35,5	26,5	12,7	48,0
S1-30-15-2	17,5			

A Figura 4.8 apresenta a variação da extensão das fissuras, em centímetros [cm], nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b), para três diferentes espaçamentos entre furos (S_h): (a) 57 mm, (b) 40 mm e (c) 30 mm. Cada gráfico exibe os valores médios observados, acompanhados das barras de erro correspondentes ao desvio-padrão, além de uma curva de regressão linear ajustada aos dados experimentais. Logo abaixo de cada gráfico, são apresentadas a equação da regressão e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), o que permite avaliar objetivamente a qualidade do ajuste dos modelos propostos.

Esse padrão gráfico (combinando médias, dispersão, modelo de regressão e coeficiente de determinação) foi mantido ao longo de todos os tópicos 4.2 a 4.5, com o objetivo de garantir uniformidade na apresentação dos resultados e facilitar a comparação entre diferentes configurações.

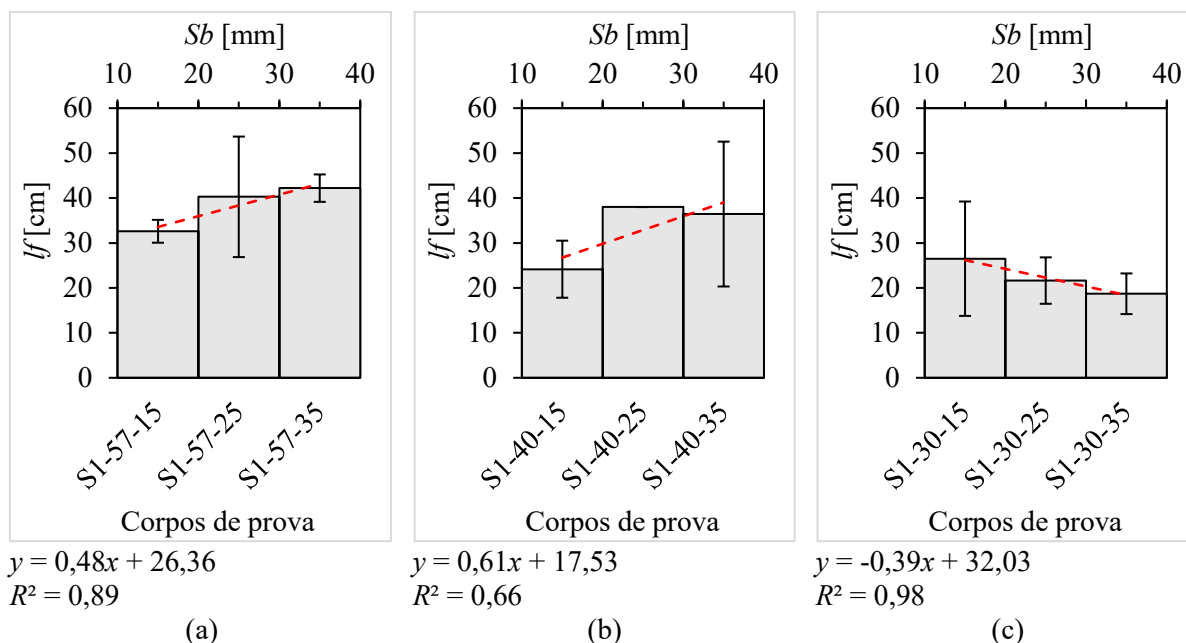


Figura 4.8 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Na Figura 4.8a ($S_h = 57$ mm), o modelo obtido foi $y = 0,48x + 26,36$, com $R^2 = 0,89$, valor classificado como “bom” conforme os critérios apresentados na Quadro B.1. Isso indica que o modelo é estatisticamente adequado para fins de análise experimental, apesar da variabilidade dos coeficientes de variação do modelo S1-57-25. A regressão revela uma correlação positiva entre a distância S_b e a extensão das fissuras, sugerindo que, quanto mais afastados os furos estão da borda interna, maior é o comprimento das fissuras desenvolvidas.

Na Figura 4.8b ($S_h = 40$ mm), a equação de regressão foi $y = 0,61x + 17,53$, com $R^2 = 0,66$, classificado como “fraco”, indicando um ajuste limitado. Apesar de manter uma tendência de crescimento da extensão das fissuras com o aumento de S_b , os dados apresentam maior dispersão. Tal dispersão pode ser atribuída a fatores externos ao modelo linear, como heterogeneidades locais, pequenas imperfeições de fabricação ou variações na aderência entre GFRP e concreto.

Ressalta-se, ainda, que a configuração S1-40-15, representada em um dos pontos da Figura 4.8b, possui apenas uma réplica válida, em virtude do descarte das demais unidades por falhas durante a concretagem. Em razão disso, não foi possível calcular o desvio-padrão para essa configuração, o que justifica a ausência de barra de erro nesse ponto específico do gráfico. Essa limitação deve ser considerada na interpretação do modelo da Figura 4.8b, pois a inclusão de um único valor reduz a representatividade estatística da regressão e pode afetar

negativamente o coeficiente de determinação. Ainda assim, optou-se por manter o dado disponível com fins de completude e coerência na apresentação dos resultados.

Por outro lado, a Figura 4.8c ($S_h = 30$ mm) apresentou um comportamento inverso e altamente consistente, com $y = -0,39x + 32,03$ e $R^2 = 0,98$, valor classificado como “excelente”, indicando um ajuste quase perfeito entre os dados experimentais e o modelo proposto. A regressão negativa mostra que, nesse caso, menores distâncias entre os furos e a borda interna resultaram em fissuras mais extensas. Esse comportamento, contrário ao observado nas demais configurações, pode ser explicado pelo encurtamento das trajetórias possíveis para a dissipação das tensões em conectores com espaçamento mais reduzido entre furos, o que favorece a concentração das fissuras nas regiões de menor confinamento do concreto.

A comparação entre os três casos reforça que a distribuição geométrica dos furos (tanto no espaçamento entre eles quanto na distância em relação à borda interna) influencia diretamente a extensão e o padrão de fissuração nos conectores de GFRP. A correlação mais consistente observada em $S_h = 30$ mm indica que geometrias mais compactas tendem a produzir comportamentos mecânicos mais previsíveis, enquanto espaçamentos maiores, como em $S_h = 40$ mm, podem resultar em respostas mais dispersas, influenciadas por múltiplos fatores não capturados pelo modelo linear adotado.

Em sequência, a Figura 4.9 apresenta a variação da extensão das fissuras, em centímetros [cm], nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), para três diferentes valores de distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b): (a) 15 mm, (b) 25 mm e (c) 35 mm. Em contraste com a Figura 4.8c, na qual se observou uma inversão de tendência no gráfico correspondente a $S_h = 30$ mm, todos os modelos apresentados na Figura 4.9 revelaram correlação positiva entre o espaçamento entre furos e a extensão das fissuras, ainda que com diferentes níveis de qualidade no ajuste.

Na Figura 4.9a ($S_b = 15$ mm), a equação obtida foi $y = 0,25x + 16,97$, com $R^2 = 0,64$, classificado como fraco segundo o Quadro B.1. Esse resultado indica uma tendência geral de aumento da extensão das fissuras com o crescimento do espaçamento entre furos, embora com significativa dispersão dos dados. Na Figura 4.9b ($S_b = 25$ mm), a regressão linear ajustada foi $y = 0,63x + 6,59$, com $R^2 = 0,72$, valor enquadrado na faixa moderada, evidenciando uma melhora na qualidade do ajuste e maior regularidade no comportamento dos dados em comparação com o caso anterior. Por fim, a Figura 4.9c ($S_b = 35$ mm) apresentou o modelo $y = 0,81x - 2,01$, com $R^2 = 0,82$, classificado como bom, representando o ajuste mais consistente entre os três cenários analisados.

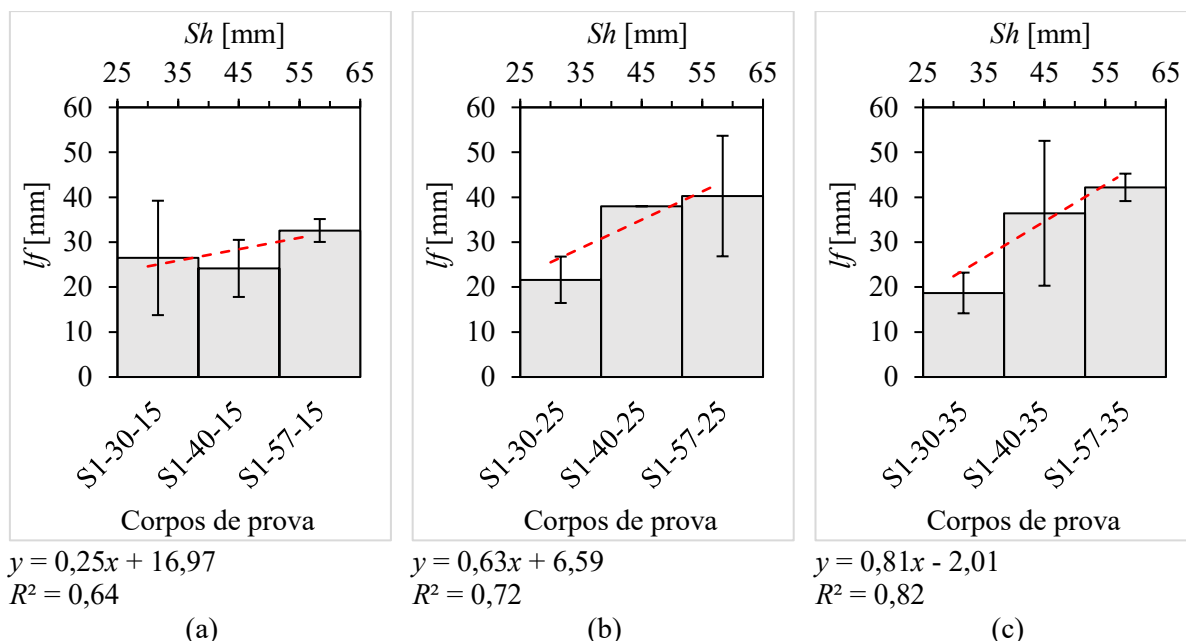


Figura 4.9 – Variação da extensão das fissuras [cm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos e a borda interna: (a) 15 mm; (b) 25 mm; e (c) 35 mm.

De modo geral, os resultados da Figura 4.9 indicam que o aumento da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b) promoveu uma melhoria progressiva na qualidade do ajuste das regressões lineares, sugerindo que, quanto maior essa distância, mais claramente se estabelece a relação entre o espaçamento entre furos (S_h) e a extensão das fissuras. Isso pode estar associado à redução da interferência entre as regiões de concentração de tensões próximas à borda interna, tornando os efeitos do parâmetro S_h mais evidentes e estatisticamente consistentes.

Por fim, destaca-se novamente a ressalva relativa à configuração S1-40-25, a qual conta com apenas uma réplica válida, em razão do descarte das demais unidades por falhas na concretagem. Como consequência, não foi possível calcular o desvio-padrão para esse ponto, o que justifica a ausência da barra de erro correspondente na Figura 4.9b. Essa limitação estatística deve ser levada em consideração na análise do modelo e permanece válida para todos os resultados em que a configuração S1-40-25 estiver incluída ao longo do Capítulo 4.2.

Em sequência, a Tabela 4.5 apresenta os valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação da extensão das fissuras nos conectores da Série 1, agora agrupados por espaçamento entre furos ($S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). O objetivo deste agrupamento é fornecer uma

visão geral do comportamento médio associado ao afastamento entre furos, permitindo avaliar se o simples aumento ou redução de S_h influencia a extensão das fissuras, de forma agregada.

Tabela 4.5 – Valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos.

Código	x_n [cm]	$\bar{x}$ [cm]	s [cm]	c_v [%]
S1-57-35-1	39,7	39,1	8,5	21,7
S1-57-35-2	41,3			
S1-57-35-3	45,6			
S1-57-25-1	36,7			
S1-57-25-2	55,1			
S1-57-25-3	29,0	31,4	12,1	38,5
S1-57-15-1	30,8			
S1-57-15-2	34,4			
S1-40-35-1	55,0			
S1-40-35-2	28,3			
S1-40-35-3	26,0	22,2	7,1	31,8
S1-40-25-1	38,0			
S1-40-15-1	31,5			
S1-40-15-2	20,4			
S1-40-15-3	20,6			
S1-30-35-1	15,5	22,2	7,1	31,8
S1-30-35-2	21,9			
S1-30-25-1	27,0			
S1-30-25-2	21,2			
S1-30-25-3	16,7			
S1-30-15-1	35,5	17,5		
S1-30-15-2	17,5			

Esse procedimento aumenta a confiabilidade estatística dos resultados, pois eleva o número de réplicas por grupo: o agrupamento por $S_h = 57$ mm contempla oito réplicas, enquanto os grupos com $S_h = 40$ mm e $S_h = 30$ mm contam com sete réplicas cada. Com um número mais robusto de dados por conjunto, é possível obter médias mais representativas e estimativas mais consistentes dos desvios-padrão e dos coeficientes de variação.

Por outro lado, reconhece-se que esse tipo de apresentação repete os valores individuais já exibidos anteriormente, o que pode comprometer a concisão do Tese. Ainda assim, optou-se por manter essa forma de exposição em função do seu valor analítico agregado. Este procedimento foi adotado sistematicamente ao longo de todas as análises do Capítulo 4.2, buscando equilibrar riqueza de informação e robustez estatística na interpretação dos resultados.

A Figura 4.10 apresenta a variação da extensão das fissuras nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), considerando os dados médios agrupados previamente na Tabela 4.5. O objetivo deste gráfico é consolidar uma leitura geral sobre o comportamento dos conectores quando se altera exclusivamente a distância entre os furos, isolando esse parâmetro das demais variáveis geométricas.

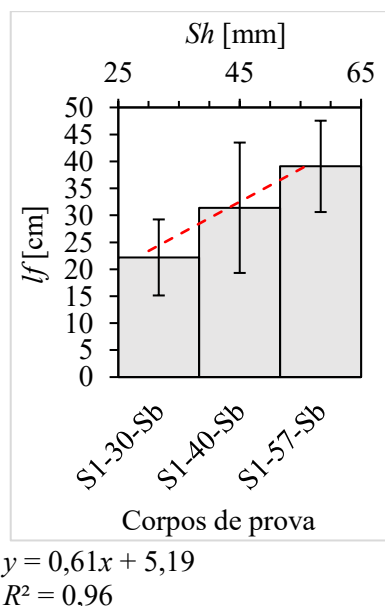


Figura 4.10 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos.

O modelo de regressão linear ajustado aos dados resultou na equação $y = 0,61x + 5,19$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$, valor classificado como “excelente” segundo os critérios estabelecidos no Quadro B.1. Esse elevado grau de correlação demonstra que existe uma relação direta e altamente previsível entre o aumento do espaçamento entre furos e a extensão das fissuras. Em outras palavras, quanto mais afastados os furos ao longo do conector, maior tende a ser o comprimento das fissuras desenvolvidas durante os ensaios de cisalhamento duplo.

Esse resultado confirma e reforça as tendências observada na Figura 4.9, agora sob uma perspectiva mais agregada e estatisticamente robusta. A combinação entre aumento do número de réplicas por grupo (conforme discutido na Tabela 4.5) e a clara linearidade da resposta contribui para consolidar a influência significativa do parâmetro S_h no desempenho dos conectores em relação à fissuração.

Em continuidade, a Tabela 4.6 apresenta os valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação da extensão das fissuras nos conectores da Série 1, agora agrupados por distância entre furos e borda interna do conector ($S_b = 15$ mm, 25 mm e 35 mm),

independentemente da distância entre furos. O objetivo é analisar o comportamento médio da fissuração em função desse parâmetro geométrico. Assim como na Tabela 4.5, o agrupamento aumentou o número de réplicas por grupo, contribuindo para maior confiabilidade estatística dos resultados: oito réplicas para $S_b = 35$ mm e sete réplicas para $S_b = 25$ mm e 15 mm, respectivamente.

Tabela 4.6 – Valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s_d) e coeficientes de variação (c_v) da extensão das fissuras nos conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos e borda interna.

Código	x_n [cm]	$\bar{x}$ [cm]	s_d [cm]	c_v [%]
S1-57-35-1	39,7	34,2	13,3	39,1
S1-57-35-2	41,3			
S1-57-35-3	45,6			
S1-40-35-1	55,0			
S1-40-35-2	28,3			
S1-40-35-3	26,0			
S1-30-35-1	15,5			
S1-30-35-2	21,9			
S1-57-25-1	36,7	32,0	12,8	39,9
S1-57-25-2	55,1			
S1-57-25-3	29,0			
S1-40-25-1	38,0			
S1-30-25-1	27,0			
S1-30-25-2	21,2			
S1-30-25-3	16,7			
S1-57-15-1	30,8	27,2	7,5	27,5
S1-57-15-2	34,4			
S1-40-15-1	31,5			
S1-40-15-2	20,4			
S1-40-15-3	20,6			
S1-30-15-1	35,5			
S1-30-15-2	17,5			

A Figura 4.11 apresenta a variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b), com base nos valores médios consolidados na Figura 4.6. O gráfico busca evidenciar o comportamento médio da fissuração a partir desse parâmetro geométrico, independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

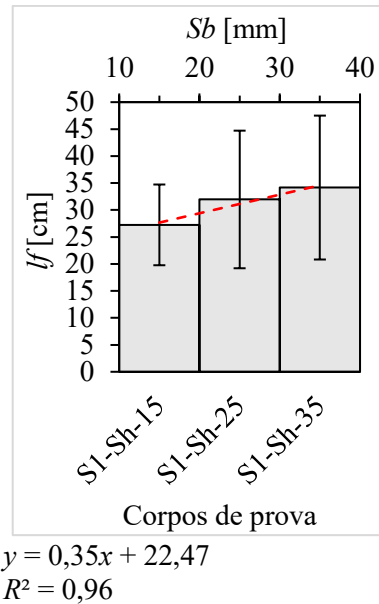


Figura 4.11 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda interna.

O modelo de regressão linear ajustado aos dados resultou na equação $y = 0,35x + 22,47$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$, valor classificado como excelente, de acordo com os critérios estabelecidos no Quadro B.1. A alta determinação obtida indica que o aumento da distância entre os furos e a borda interna (S_b) está associado, de forma consistente, ao aumento da extensão das fissuras, confirmando a influência desse parâmetro sobre o comportamento dos conectores.

Comparando com a Figura 4.10, que trata do espaçamento entre furos (S_h), observa-se que ambas as variáveis apresentaram tendência linear crescente e coeficientes de determinação igualmente elevados ($R^2 = 0,96$ para ambas), evidenciando que tanto S_h quanto S_b exercem influência relevante e bem definida sobre a extensão das fissuras. No entanto, a inclinação da reta em cada gráfico indica que o efeito do espaçamento entre furos (S_h) foi mais acentuado, com coeficiente angular de 0,61 na Figura 4.10, enquanto a Figura 4.11 apresentou inclinação de 0,35. Isso sugere que, embora os dois parâmetros sejam importantes, o espaçamento entre furos possui maior impacto na propagação das fissuras do que a variação da posição dos furos em relação à borda interna.

Cabe destacar que a extensão das fissuras considerada nesta análise se refere ao estado final de fissuração dos conectores, registrado ao término dos ensaios de cisalhamento duplo. Embora os ensaios tenham sido conduzidos com controle de deslocamento, o encerramento foi realizado manualmente, geralmente quando os transdutores de deslocamento atingiam o fim de curso, como forma de padronização. Por se tratar de uma decisão operada manualmente, pequenas variações no momento de finalização são esperadas. Ainda assim, os

resultados obtidos apresentaram boa consistência e determinação estatística, especialmente quando agrupados por parâmetro geométrico.

4.2.2 Carregamento *versus* deslizamento relativo

Este item apresenta as curvas força versus deslizamento relativo obtidas nos ensaios de cisalhamento duplo da Série 1. Inicialmente, são analisadas as réplicas individuais de cada configuração, e, na sequência, as curvas médias agrupadas. O foco aqui é visualizar o comportamento geral dos conectores ao longo da aplicação da força, com especial interesse na resposta característica das curvas obtidas. De modo geral, observou-se boa concordância entre as réplicas de cada configuração, o que reforça a consistência e a repetibilidade dos ensaios realizados.

4.2.2.1 Gráficos individuais

A Figura 4.12 apresenta as curvas força versus deslizamento relativo das réplicas individuais de seis das dez configurações da Série 1, contemplando os conectores com espaçamentos entre furos de 57 mm (Figura 4.12a a Figura 4.12c) e 40 mm (Figura 4.12d a Figura 4.12f). Em algumas configurações, é possível identificar um comportamento pós-pico mais suave, caracterizado por uma redução gradual da carga e prolongamento do deslizamento, formando uma espécie de patamar de resistência residual. Essa resposta foi observada nos conectores S1-57-35 (Figura 4.12a), S1-57-25 (Figura 4.12b), S1-40-35 (Figura 4.12d) e S1-40-25 (Figura 4.12e). Vale reiterar que, conforme já mencionado anteriormente, a configuração S1-40-25 contou com apenas uma réplica válida, devido ao descarte das demais por falhas na concretagem. Apesar disso, a curva obtida apresenta um comportamento compatível com o observado em outras configurações com dúctil, contribuindo qualitativamente para a análise.

Em contraste, os conectores S1-57-15 (Figura 4.12c) e S1-40-15 (Figura 4.12f) apresentaram queda de força mais abrupta após o pico, seguida de um trecho relativamente plano de deslizamento até o limite de curso dos LVDTs. Esse comportamento, com baixa capacidade de sustentação de força após o pico, sugere um mecanismo de falha mais frágil e com menor capacidade de redistribuição de tensões, possivelmente influenciado pela menor distância entre os furos e as bordas internas.

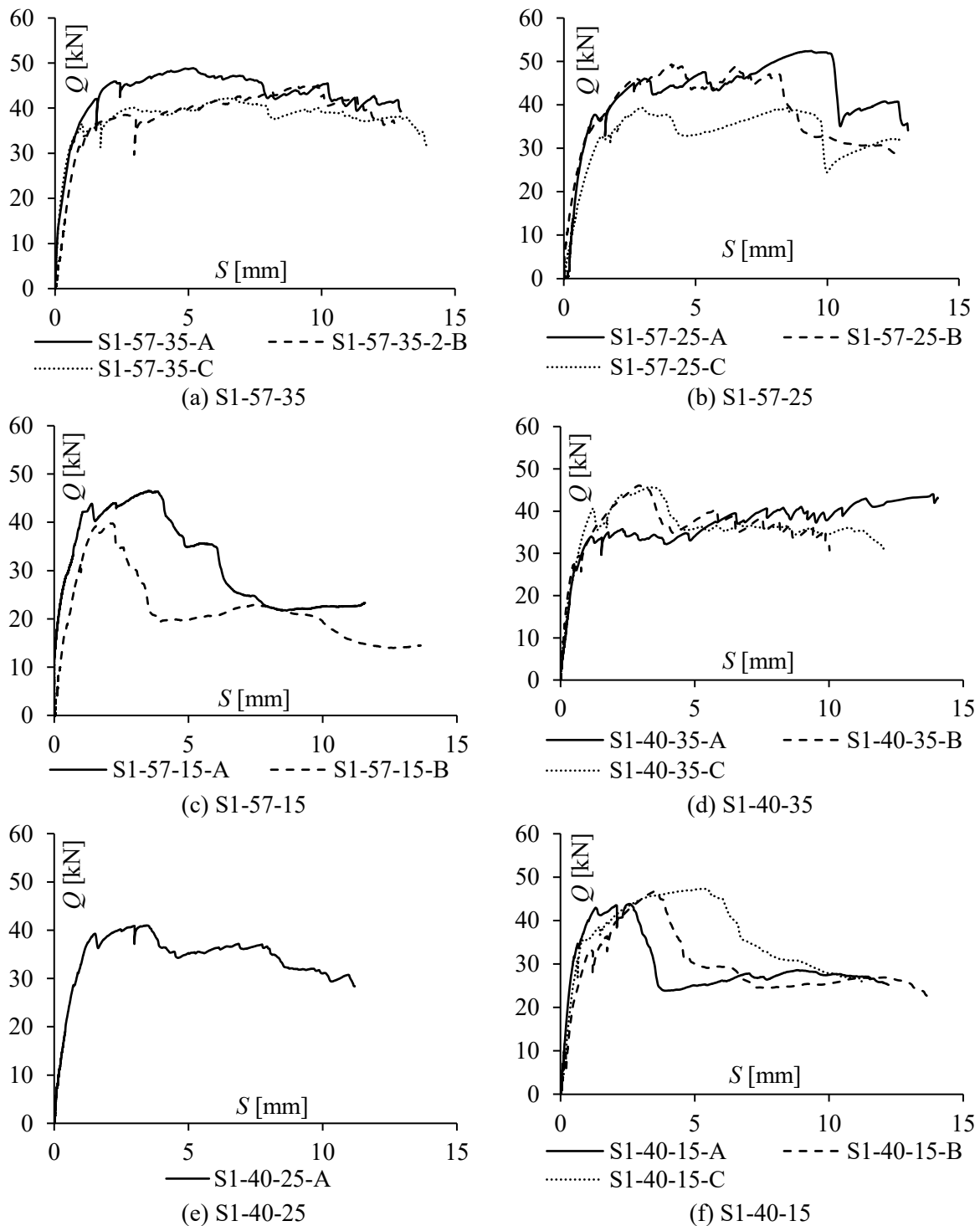


Figura 4.12 – Curvas força *versus* deslizamento relativo dos conectores da Série 1: (a) S1-57-35; (b) S1-57-25; (c) S1-57-15; (d) S1-40-35; (e) S1-40-25; e (f) S1-40-15.

A Figura 4.13 apresenta as curvas força *versus* deslizamento relativo de mais quatro configurações da Série 1, complementando as curvas mostradas na Figura 4.12. Estão incluídas três configurações com espaçamento entre furos de 30 mm: S1-30-35 (Figura 4.12a), S1-30-25 (Figura 4.12b) e S1-30-15 (Figura 4.12c), além do grupo controle sem furos (Figura 4.12d).

Com essas curvas, completa-se a análise individual das réplicas de todas as dez configurações testadas na Série 1.

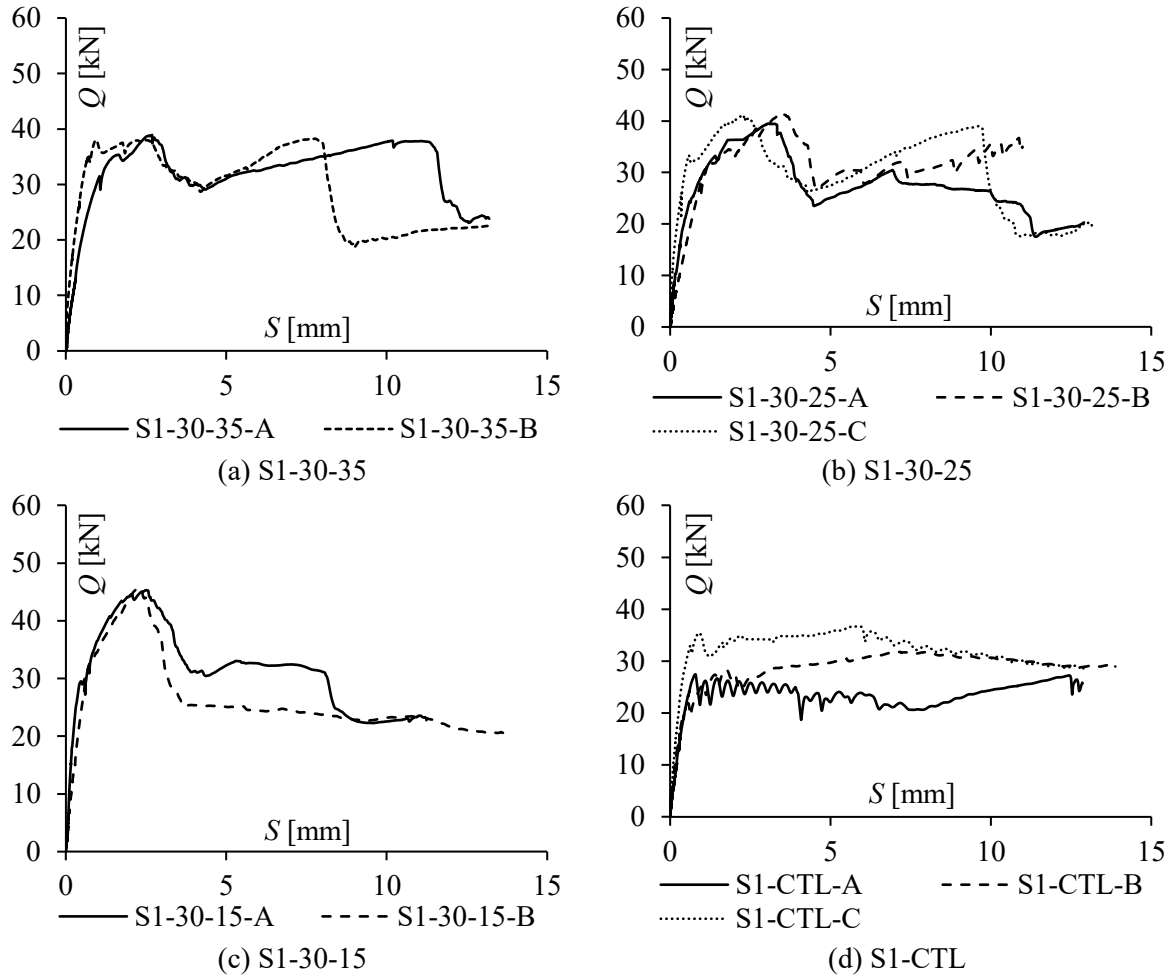


Figura 4.13 – Curvas força *versus* deslizamento relativo dos conectores da Série 1: (a) S1-30-35; (b) S1-30-25; (c) S1-30-15; (d) S1-CTL.

De modo geral, pelos dados da Figura 4.13, observa-se que as forças máximas atingiram cerca de 40 a 50 kN. A única exceção foi o grupo controle (S1-CTL), cuja carga máxima ficou em torno de 30 a 40 kN, significativamente inferior às demais, como esperado em função da ausência de mecanismos de ancoragem por perfuração.

Entre os conectores com espaçamento entre furos de 30 mm, destacam-se os modelos S1-30-35 (Figura 4.13a) e S1-30-25 (Figura 4.13b), que apresentaram comportamento pós-pico compatível com um perfil mais dúctil, incluindo trechos com resistência residual relativamente estável. Já a configuração S1-30-15 (Figura 4.13c) apresentou um comportamento menos dúctil, com queda acentuada de força após o pico, semelhante ao observado nas configurações com menor S_b na figura anterior (Figura 4.12).

O grupo controle (S1-CTL), por sua vez, apresentou uma resposta peculiar: apesar da ausência de furos, o gráfico exibiu pequenas oscilações intervalares na curva, após o pico ou após o fim do regime elástico, principalmente na Figura 4.13c. Esse padrão indica a ocorrência de momentos alternados de deslizamento relativo entre o conector e o concreto, seguidos por episódios de mobilização por atrito, provavelmente decorrentes do confinamento local dentro da matriz de concreto. Trata-se de um comportamento distinto dos conectores perfurados, que aponta para um mecanismo de transferência de esforços essencialmente dependente do atrito e do efeito de aderência superficial.

4.2.2.2 Gráficos combinados

A Figura 4.14, em sequência, apresenta as curvas força *versus* deslizamento relativo agrupadas por espaçamento entre furos (S_h), de acordo com o procedimento descrito no item “3.5 Processamento dos dados”. Cada gráfico mostra as curvas médias das três configurações de uma mesma série, variando-se a distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 15$ mm, 25 mm e 35 mm). Foram obtidas as curvas das configurações S1-57- S_b (Figura 4.14a), S1-40- S_b (Figura 4.14b) e S1-30- S_b (Figura 4.14c). Esse tipo de representação facilita a análise comparativa, ao reduzir a quantidade de curvas exibidas, preservando os comportamentos médios e tornando mais clara a identificação das diferenças entre as configurações.

Na Figura 4.14a (S1-57- S_b), observa-se uma distinção sutil entre as curvas com $S_b = 35$ mm e $S_b = 25$ mm. Ambas apresentam comportamento marcadamente dúctil, com pós-pico mais prolongado e capacidade de manter a força durante o deslizamento. A diferença entre as duas surge nas fases finais de aplicação da força, quando a curva de $S_b = 25$ mm passa a apresentar uma queda de força mais acentuada, indicando uma ductilidade ligeiramente inferior em comparação à de 35 mm. Já a configuração com $S_b = 15$ mm demonstra um comportamento visivelmente menos dúctil, com queda de força mais marcante após o pico, com redução moderada de força ao longo do deslizamento.

Na Figura 4.14b (S1-40- S_b), repete-se uma tendência semelhante, com a curva de $S_b = 35$ mm apresentando um comportamento levemente mais dúctil do que a de 25 mm, e a curva de 15 mm novamente se destacando por sua menor capacidade de sustentação de força após o pico. Contudo, a diferença entre as curvas é menos acentuada do que a observada na Figura 4.14a, indicando que a influência de S_b no comportamento dos conectores pode ser parcialmente atenuada conforme o espaçamento entre furos diminui.

Já na Figura 4.14c (S1-30- S_b), observa-se que as três curvas apresentam comportamentos bastante semelhantes entre si, tanto em relação à ductilidade quanto à forma

geral da resposta. A curva correspondente a $S_b = 25$ mm, inclusive, alcança o maior pico de força entre as três. A proximidade entre os resultados sugere que, em conectores com furos muito próximos entre si ($S_h = 30$ mm), a influência da distância em relação à borda interna tende a ser menos relevante para o comportamento global da ligação.

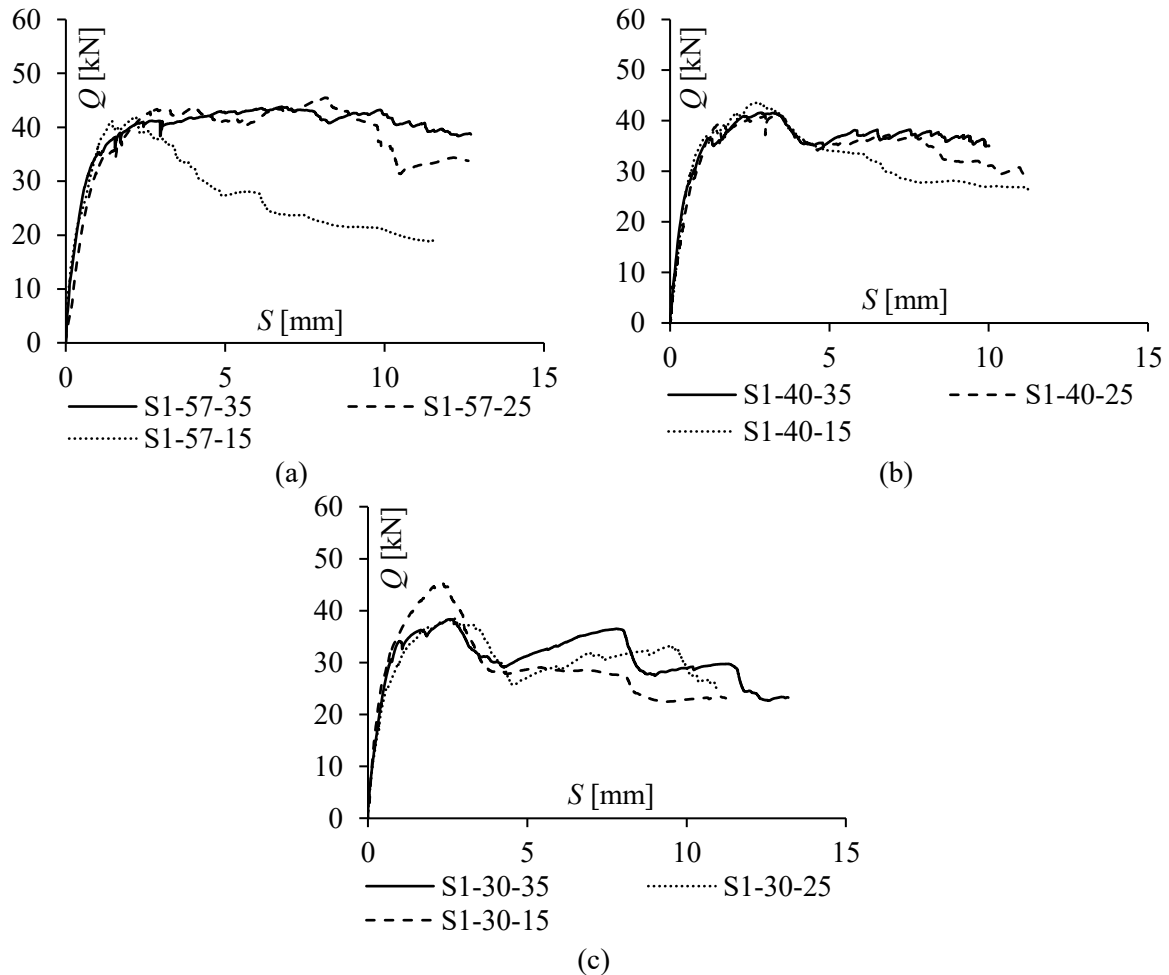


Figura 4.14 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 1: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; e (c) S1-30- S_b .

Em complemento à Figura 4.14, anteriormente apresentada, a Figura 4.15 apresenta as curvas força *versus* deslizamento relativo da Série 1 agrupadas por distância entre os furos e a borda interna (S_b). Essa organização permite comparar diretamente o efeito do espaçamento entre furos (S_h) mantendo-se constante a distância até a borda interna, evidenciando como S_h influencia a capacidade resistente e o comportamento no pós-pico.

Na Figura 4.15a (S1- S_h -35), observa-se que todas as curvas apresentam comportamento visivelmente dúctil, com um pós-pico praticamente linear, caracterizado por força residual sustentada durante o deslizamento. A curva de $S_h = 30$ mm apresenta uma queda de força no pós-pico, mais acentuada nos trechos finais, mas ainda mantém certo

prolongamento. As curvas de 57 mm, 40 mm e 30 mm exibem uma ordenação clara, com a curva de 57 mm se mantendo acima da de 40 mm, que, por sua vez, está acima da de 30 mm em praticamente todos os trechos do gráfico. Esse padrão indica que os conectores com maior espaçamento entre furos resistem a níveis mais elevados de força ao longo de toda a aplicação, sugerindo um desempenho estrutural superior à medida que S_h aumenta.

Na Figura 4.15b (S1- S_h -25), repete-se a tendência de comportamento dúctil, embora com quedas de força mais perceptíveis após o pico, especialmente nos trechos finais. A ordenação entre as curvas se mantém, com a de 57 mm posicionada acima das demais, seguida por 40 mm e 30 mm, confirmando a influência positiva do aumento de S_h na capacidade de carga, durante a aplicação de força.

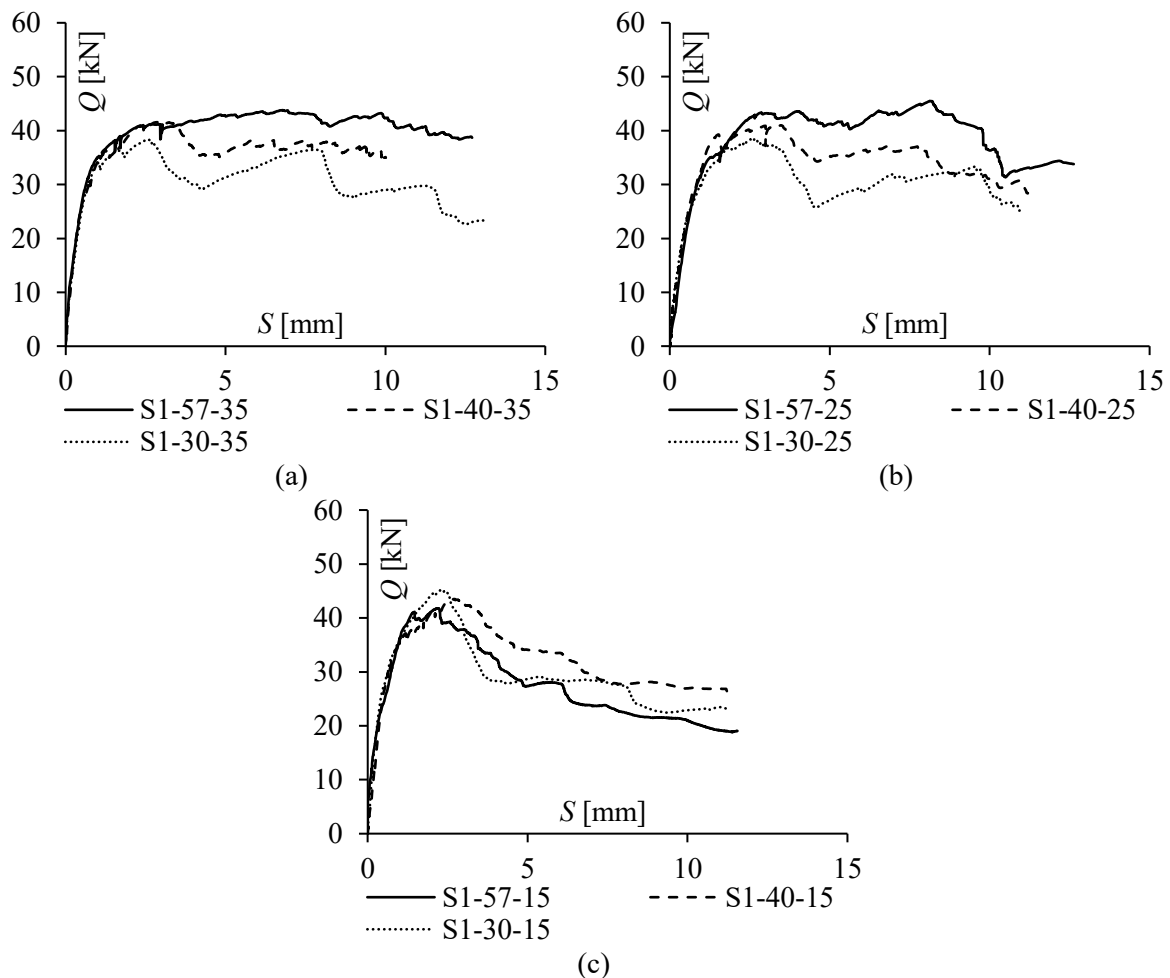


Figura 4.15 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 1: (a) S1- S_h -35; (b) S1- S_h -25; e (c) S1- S_h -15.

Já na Figura 4.15c (S1- S_h -15), observa-se maior semelhança entre as curvas, independentemente do valor de S_h . Todas apresentam uma queda de carga mais acentuada e contínua após o pico, embora essa queda não ocorra de forma abrupta. Nesse caso, a influência

do espaçamento entre furos sobre o comportamento global da ligação é menos evidente, o que pode estar relacionado ao efeito dominante da proximidade dos furos em relação à borda interna do conector.

A Figura 4.16 apresenta a curva força *versus* deslizamento relativo do grupo controle (S1-CTL), construída a partir da média das réplicas obtidas nos ensaios. O gráfico revela que, após o pico de força, o conector sem furos apresentou um comportamento praticamente linear, que se prolonga até o fim do curso dos LVDTs. Isso sugere que o mecanismo resistente permaneceu ativo, mesmo após o carregamento máximo, sustentando a carga com certa regularidade ao longo do deslizamento.

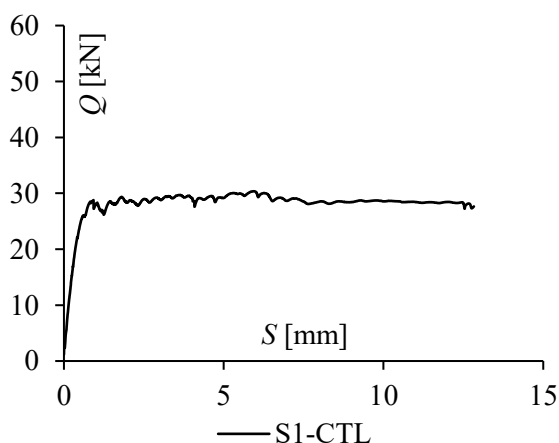


Figura 4.16 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 1: S1-CTL

Além disso, foram observadas pequenas oscilações no trecho pós-pico, com padrão “quase senoidal”, já identificado também nas curvas individuais (Figura 4.13d). Essas oscilações indicam a ocorrência de momentos alternados de deslizamento entre o conector e o concreto, seguidos por fases de mobilização por atrito, causadas pelo confinamento do GFRP na matriz de concreto. O comportamento do grupo controle, embora mais estável do ponto de vista da força, difere substancialmente dos conectores perfurados, que apresentam mecanismos mais evidentes de dissipação de energia e variação de rigidez ao longo do carregamento.

Com o objetivo de resumir de forma ainda mais concisa o comportamento das curvas força *versus* deslizamento relativo, um novo agrupamento foi feito na Figura 4.17. Cada uma das três curvas mostradas na Figura 4.17a (S1-57- S_b , S1-40- S_b e S1-30- S_b) consistem nas médias das curvas apresentadas, respectivamente, na Figura 4.14a, na Figura 4.14b e na Figura 4.14c. Já na Figura 4.17b, cada uma das três curvas exibidas (S1- S_h -35, S1- S_h -25 e S1- S_h -15) são compostas pelas médias das curvas expostas, respectivamente, na Figura 4.14a (S1- S_h -35), na Figura 4.14b (S1- S_h -25) e na Figura 4.14c (S1- S_h -15).

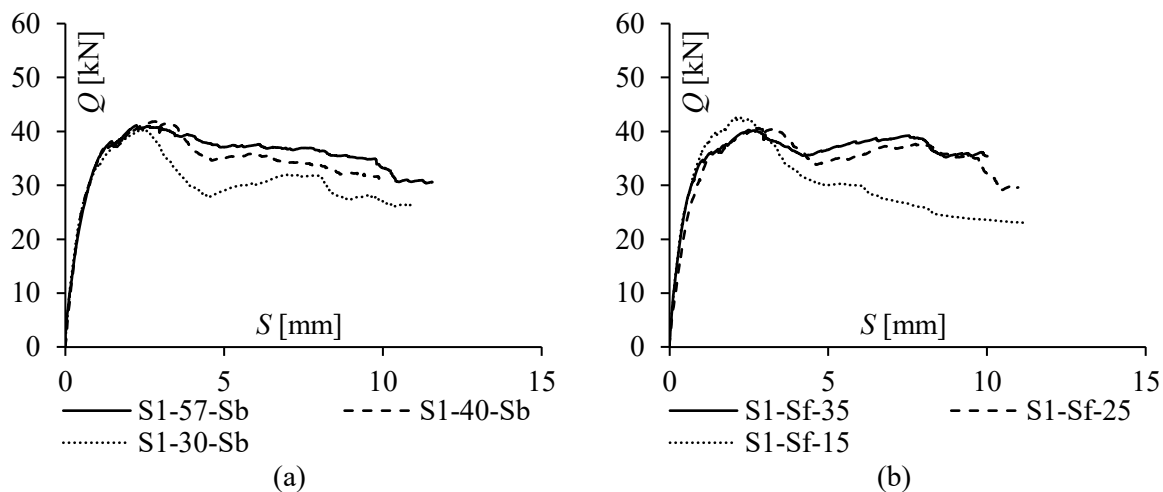


Figura 4.17 – Curvas médias força versus deslizamento relativo da Série 1 agrupadas por parâmetros geométricos: (a) S_h ; e (b) S_b .

Na Figura 4.14a, observa-se um comportamento predominantemente dúctil, com um pós-pico suavemente decrescente, sobretudo para as configurações com $S_h = 57$ mm e 40 mm. A curva correspondente a 30 mm apresenta uma queda de força mais acentuada após o pico, refletindo menor capacidade de sustentação no regime plástico. A disposição das curvas segue o padrão já identificado anteriormente: a curva de 57 mm se mantém acima da de 40 mm, e está acima da de 30 mm, em praticamente todos os trechos, indicando maior capacidade de força com o aumento do espaçamento entre furos.

Na Figura 4.14b, nota-se que as curvas de 35 mm e 25 mm apresentam respostas semelhantes, com pós-pico estável e até mesmo uma leve recuperação elástica. Já a curva de $S_b = 15$ mm apresenta uma queda de carga mais pronunciada após o pico, indicando comportamento menos dúctil, embora ainda com certa continuidade no deslizamento. Essa consolidação gráfica evidencia de forma clara que tanto o aumento do espaçamento entre furos (S_h) quanto da distância até a borda interna (S_b) contribuem para um comportamento mais favorável, com maior capacidade de carga e melhor desempenho no regime pós-pico.

4.2.3 Parâmetros mecânicos

A avaliação quantitativa do comportamento dos conectores da Série 1 foi conduzida por meio da extração de parâmetros mecânicos obtidos a partir das curvas força *versus* deslizamento relativo. Esses parâmetros incluem a capacidade última, o deslizamento correspondente, os coeficientes de rigidez (inicial, elástico e inelástico) e outros indicadores relevantes para a caracterização do desempenho estrutural. A análise foi realizada com base em critérios previamente estabelecidos no Capítulo 3, permitindo comparações consistentes entre

as diferentes configurações geométricas testadas. Os resultados obtidos são apresentados a seguir, acompanhados de comentários sobre sua variabilidade, tendências observadas e possíveis correlações com as variáveis geométricas estudadas.

4.2.3.1 Capacidade última, deslocamento na capacidade última e rigidez inicial

A Tabela 4.7 apresenta os valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação dos parâmetros mecânicos para cada configuração da Série 1, permitindo a comparação direta entre geometrias distintas e a avaliação da variabilidade entre réplicas. Observa-se que as médias de capacidade última variaram entre 38,59 kN (S1-30-35) e 47,08 kN (S1-57-25), com a maioria dos valores concentrados na faixa entre 40 kN e 46 kN. Isso indica que, mesmo entre conectores com diferentes disposições geométricas, os valores de força máxima permaneceram relativamente próximos, com destaque para os conectores com maior espaçamento entre furos, que tendem a apresentar valores ligeiramente superiores. Como complemento às análises experimentais, o Capítulo 5 apresenta modelos analíticos voltados à estimativa da capacidade última dos conectores PERFOFRP. Em particular, a Seção 5.2.2 foi calibrada com os dados da Série 1.

Em relação ao deslocamento na capacidade última, os valores médios oscilaram de forma mais expressiva, variando de 2,38 mm (S1-30-15) a 6,93 mm (S1-57-35). Essa dispersão reflete o grau de ductilidade observado nas curvas apresentadas anteriormente, sendo os maiores deslocamentos associados aos conectores com S_b e S_h mais elevados, como nos casos S1-57-35 e S1-40-35, enquanto os menores deslocamentos foram registrados nas configurações com furos mais próximos das bordas internas, como em S1-30-15 e S1-57-15.

A rigidez inicial também apresentou variação significativa entre as configurações, com valores médios que vão de 28,50 kN/mm (S1-57-25) a 49,15 kN/mm (S1-30-35). Os dados indicam que não há uma tendência única entre rigidez e capacidade última, o que é compatível com a natureza complexa da rigidez inicial em ensaios de cisalhamento, influenciada por diversos fatores, incluindo as acomodações iniciais e a qualidade do contato entre os materiais. Conectores como S1-30-35, S1-30-15 e S1- C_{TL} destacaram-se pelos valores mais elevados de rigidez, ao passo que configurações como S1-57-35 e S1-57-25 apresentaram os valores mais baixos, apesar de sua maior capacidade de carga e ductilidade.

Tabela 4.7 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 1: capacidade última (Q_{lu}), deslocamento na capacidade última (S_{lu}) e rigidez inicial (K_f).

Código	$Q_{lo,u}$				$S_{lo,u}$				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	48,86				5,18				44,57			
S1-57-35-B	44,84	45,30	3,35	7,40	9,09	6,93	1,99	28,70	35,01	46,87	13,16	28,07
S1-57-35-C	42,20				6,51				61,02			
S1-57-25-A	52,40				9,39				26,61			
S1-57-25-2	49,52	47,08	6,87	14,60	4,28	5,54	3,40	61,26	32,15	28,50	3,16	11,09
S1-57-25-C	39,32				2,96				26,74			
S1-57-15-A	46,53				3,54				48,32			
S1-57-15-B	39,78	43,16	4,77	11,06	2,07	2,81	1,04	37,06	33,96	41,14	10,15	24,68
S1-40-35-A	44,00				13,88				36,62			
S1-40-35-B	46,08	45,25	1,10	2,43	2,95	6,70	6,22	92,75	33,14	37,72	5,22	13,83
S1-40-35-C	45,66				3,28				43,40			
S1-40-25-A	41,00	41,00	–	–	3,42	3,42	–	–	40,03	40,03	–	–
S1-40-15-A	43,82				2,56				64,27			
S1-40-15-B	46,86	45,99	1,89	4,11	3,52	3,82	1,44	37,64	30,43	46,92	16,94	36,10
S1-40-15-C	47,28				5,39				46,05			
S1-30-35-A	38,93				2,69				34,28			
S1-30-35-B	38,25	38,59	0,48	1,25	7,71	5,20	3,55	68,26	64,01	49,15	21,02	42,78
S1-30-25-A	39,48				3,05				32,33			
S1-30-25-B	41,31	40,65	1,01	2,49	3,53	2,95	0,63	21,35	27,57	42,55	21,95	51,59
S1-30-25-C	41,15				2,28				67,75			
S1-30-15-A	45,32				2,50				46,06			
S1-30-15-B	45,65	45,49	0,23	0,51	2,26	2,38	0,17	7,13	45,83	45,95	0,16	0,35
S1-CTL-A	27,47				0,79				45,59			
S1-CTL-B	31,77	31,98	4,61	14,43	7,06	4,57	3,33	72,84	29,95	48,40	20,00	41,33
S1-CTL-C	36,69				5,85				69,66			

A Figura 4.18 apresenta a variação da capacidade última (Q_{lu}) dos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 15$ mm, 25 mm e 35 mm), para três diferentes valores de espaçamento entre furos (S_h): (a) 57 mm, (b) 40 mm e (c) 30 mm. Cada gráfico traz as médias de Q_{lu} para as respectivas configurações, além da curva de regressão linear ajustada e seu coeficiente de determinação (R^2), conforme metodologia adotada no item “3.5 Processamento dos dados”.

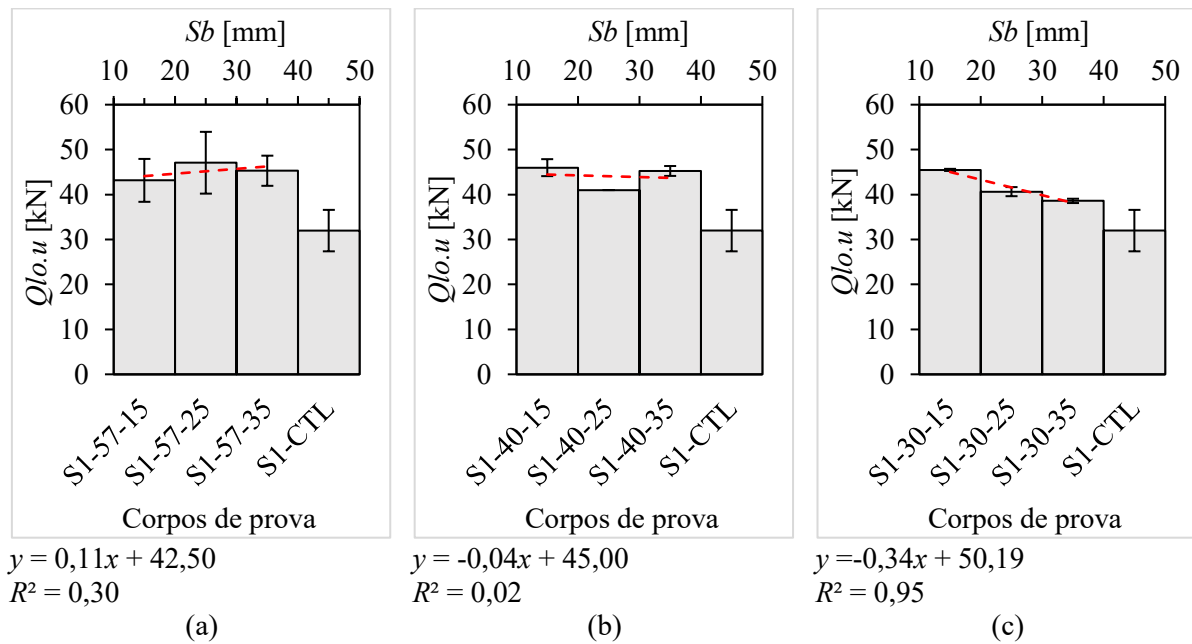


Figura 4.18 – Variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Na Figura 4.18a ($S_h = 57$ mm), a regressão obtida foi $y = 0,11x + 42,50$, com $R^2 = 0,30$, indicando uma fraca correlação positiva entre o aumento de S_b e a capacidade última. Já na Figura 4.18b ($S_h = 40$ mm), o modelo ajustado foi $y = -0,04x + 45,00$, com $R^2 = 0,02$, sugerindo ausência de correlação entre as variáveis. Por fim, a Figura 4.18c ($S_h = 30$ mm) apresentou a regressão $y = -0,34x + 50,19$, com $R^2 = 0,95$, o que representa um ajuste excelente, indicando forte correlação negativa entre S_b e $Q_{lo,u}$ para esse grupo.

Esses resultados demonstram que não há um padrão claro ou consistente de comportamento entre a capacidade última e a distância entre os furos e a borda interna quando se analisam as diferentes configurações de conectores. A qualidade do ajuste das regressões varia significativamente, evidenciando que o efeito de S_b sobre a capacidade última pode depender da interação com o espaçamento entre furos (S_h). Apesar dessa variabilidade, observa-se que todas as configurações com furos apresentaram desempenho superior ao grupo controle,

cuja média foi de 31,98 kN, indicando que a introdução dos furos nas chapas de GFRP contribuiu para o aumento da capacidade resistente dos conectores.

Para efeito de comparação com conectores contínuos da literatura, os resultados da Série 1 (capacidades médias por conector entre 38,59 kN e 47,08 kN) foram normalizados por unidade de comprimento (0,20 m), resultando em cerca de 193–235 kN/m. Nos ensaios de Lameiras (2015), realizados com laminados de 2 mm de espessura e sem frente de concreto, os valores médios de capacidade variaram entre 118,0 kN/m e 149,3 kN/m. Nota-se, portanto, que os conectores da Série 1 desta pesquisa apresentaram resistências superiores, o que se justifica principalmente pela maior espessura do laminado de GFRP adotado (4 mm contra 2 mm em Lameiras). Em contrapartida, os valores relatados por Naito *et al.* (2012) para conectores distribuídos contínuos foram consideravelmente menores, situando-se em torno de 34,0 kN/m, com variação de 17,2 a 57,8 kN/m.

A Figura 4.19 apresenta a variação do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) dos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 15$ mm, 25 mm e 35 mm), para três diferentes valores de espaçamento entre furos (S_h): (a) 57 mm, (b) 40 mm e (c) 30 mm. As curvas exibem os valores médios observados, bem como os modelos de regressão linear ajustados, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

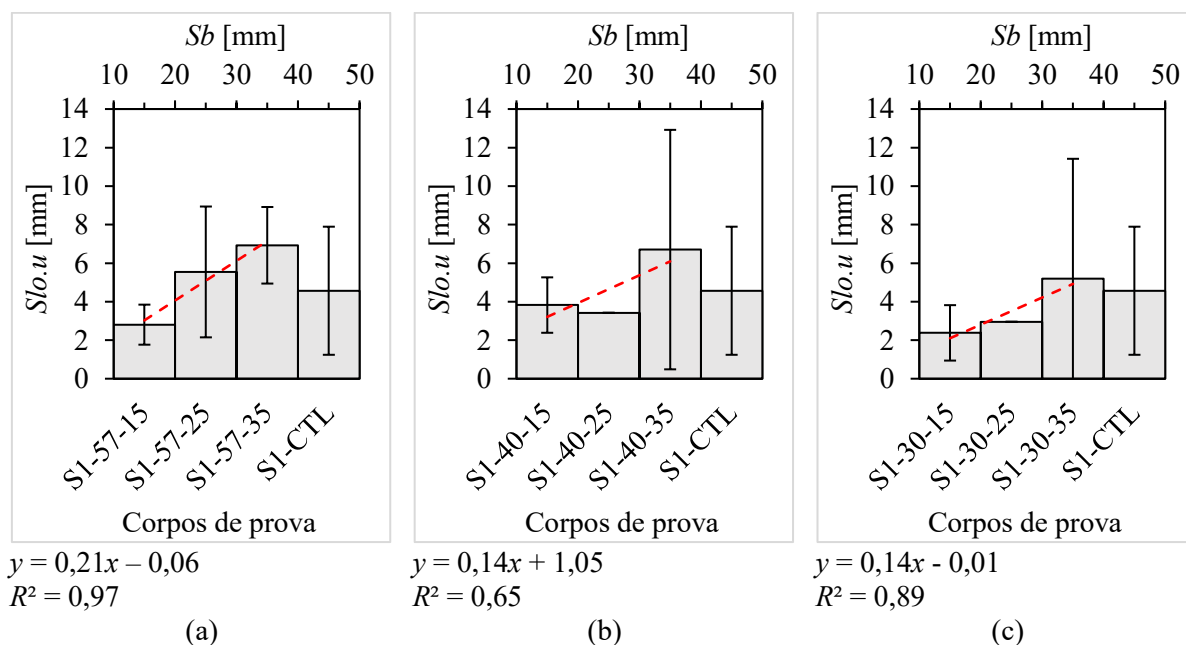


Figura 4.19 – Variação do deslocamento na capacidade última capacidade [mm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Na Figura 4.19a ($S_h = 57$ mm), a regressão $y = 0,21x - 0,06$ apresentou $R^2 = 0,97$, indicando uma forte correlação positiva entre o aumento da distância S_b e o deslocamento na capacidade última. Já na Figura 4.19b ($S_h = 40$ mm), o modelo $y = 0,14x + 1,05$, com $R^2 = 0,65$, revela uma correlação moderada, com maior dispersão nos dados. Por fim, na Figura 4.19c ($S_h = 30$ mm), a equação $y = 0,14x - 0,01$ resultou em $R^2 = 0,89$, o que indica uma correlação forte, embora ligeiramente inferior à da série com $S_h = 57$ mm.

De maneira geral, os gráficos evidenciam uma tendência clara: quanto maior a distância entre os furos e a borda interna (S_b), maior é o deslocamento na capacidade última, com variações no grau de correlação conforme o espaçamento entre furos. Essa observação é consistente com os valores apresentados na Tabela 4.7. O maior valor de $S_{lo.u}$ foi registrado na configuração S1-57-35- (6,93 mm), enquanto os menores foram observados nas configurações S1-30-15 (2,38 mm) e S1-57-15 (2,81 mm).

O grupo controle apresentou um deslocamento médio de 4,57 mm, o que representa o sexto menor valor entre as dez configurações com furos, sendo considerado intermediário nesse contexto. Além disso, o grupo controle apresentou um dos maiores desvios-padrão (3,33 mm) e elevado coeficiente de variação (72,84%), refletindo uma variabilidade significativamente superior à observada nas demais configurações. Para fins de comparação, a configuração S1-30-15, por exemplo, apresentou um coeficiente de variação de apenas 7,13%, enquanto S1-40-35 alcançou 92,75%, indicando que, embora os deslocamentos sejam relevantes para caracterizar a ductilidade, eles também estão sujeitos a maior dispersão quando comparados à capacidade última, cujos coeficientes de variação, em geral, mantiveram-se em níveis mais baixos.

A Figura 4.20 apresenta a variação da rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 15$ mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes valores de espaçamento entre furos (S_h): (a) 57 mm, (b) 40 mm e (c) 30 mm. Cada gráfico mostra a tendência geral do comportamento médio de K_f em relação ao parâmetro S_b , com a respectiva regressão linear ajustada e o coeficiente de determinação (R^2) apresentados logo abaixo.

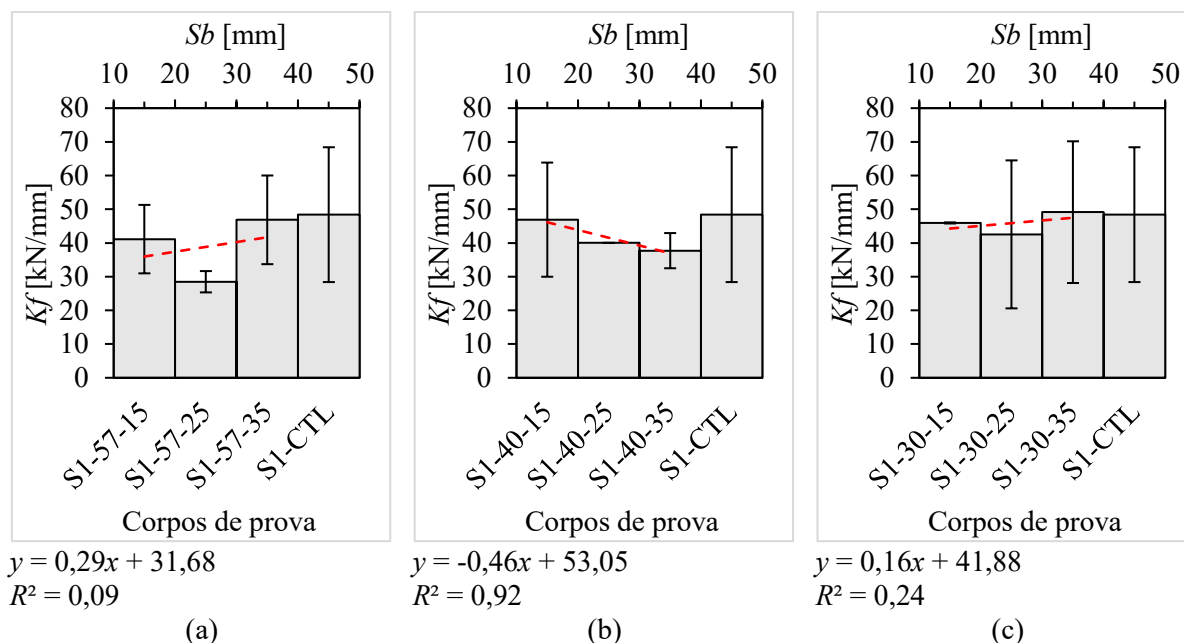


Figura 4.20 – Variação da rigidez inicial (K_f) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Na Figura 4.20a ($S_h = 57$ mm), a regressão $y = 0,29x + 31,68$ apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,09$, o que indica uma correlação muito fraca, praticamente inexistente, entre S_b e a rigidez inicial nesse grupo. Na Figura 4.20b ($S_h = 40$ mm), o modelo $y = -0,46x + 53,05$ resultou em um $R^2 = 0,92$, o que representa um ajuste excelente, com tendência de redução da rigidez à medida que S_b aumenta. Já na Figura 4.20c ($S_h = 30$ mm), a equação $y = 0,16x + 41,88$, com $R^2 = 0,24$, também indica uma correlação fraca, embora ligeiramente superior à da série com $S_h = 57$ mm.

Esses resultados demonstram a ausência de um padrão consistente de variação da rigidez inicial em função de S_b , com exceção da configuração com $S_h = 40$ mm, que apresentou comportamento regular e bem definido. Nas demais, a dispersão dos dados comprometeu a confiabilidade dos modelos ajustados, o que pode ser atribuído à própria natureza da rigidez inicial, mais sensível a variações locais e efeitos de assentamento no início do carregamento.

A análise dos dados da Tabela 4.7 confirma essa instabilidade, evidenciada pelos altos desvios-padrão e coeficientes de variação. Por exemplo, a configuração S1-40-15, que apresenta média elevada de rigidez inicial (46,92 kN/mm), também apresentou desvio-padrão de 16,94 kN/mm e coeficiente de variação de 36,10%. Já S1-30-35, embora com rigidez ainda mais elevada (49,15 kN/mm), registrou coeficiente de variação de 42,78%, reforçando que a rigidez inicial é o parâmetro mais suscetível à variabilidade entre réplicas, quando comparado com $Q_{l.o.u}$ e $S_{l.o.u}$.

Do ponto de vista físico, essa variabilidade pode estar relacionada a fatores como: comportamentos assimétricos, atrito inicial entre conector e concreto, grau de aderência desenvolvido antes da mobilização significativa da força de cisalhamento e pequenas irregularidades na interface entre os materiais, como microvazios ou diferenças no preenchimento do concreto ao redor dos furos. Além disso, o alinhamento inicial do conector nos moldes e a uniformidade do contato durante a aplicação da carga também podem afetar a rigidez no início do carregamento, amplificando diferenças entre réplicas de uma mesma configuração. Esses efeitos tendem a influenciar mais diretamente os trechos iniciais da curva força versus deslizamento, justificando o comportamento menos estável do parâmetro K_f em relação aos demais.

A Figura 4.21 apresenta os resultados da capacidade última ($Q_{lo,u}$) em função do espaçamento entre furos ($S_h = 30$ mm, 40 mm e 57 mm), organizados para três valores fixos de distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm). Os gráficos trazem as médias de $Q_{lo,u}$ observadas para cada combinação geométrica, acompanhadas dos modelos de regressão linear ajustados e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

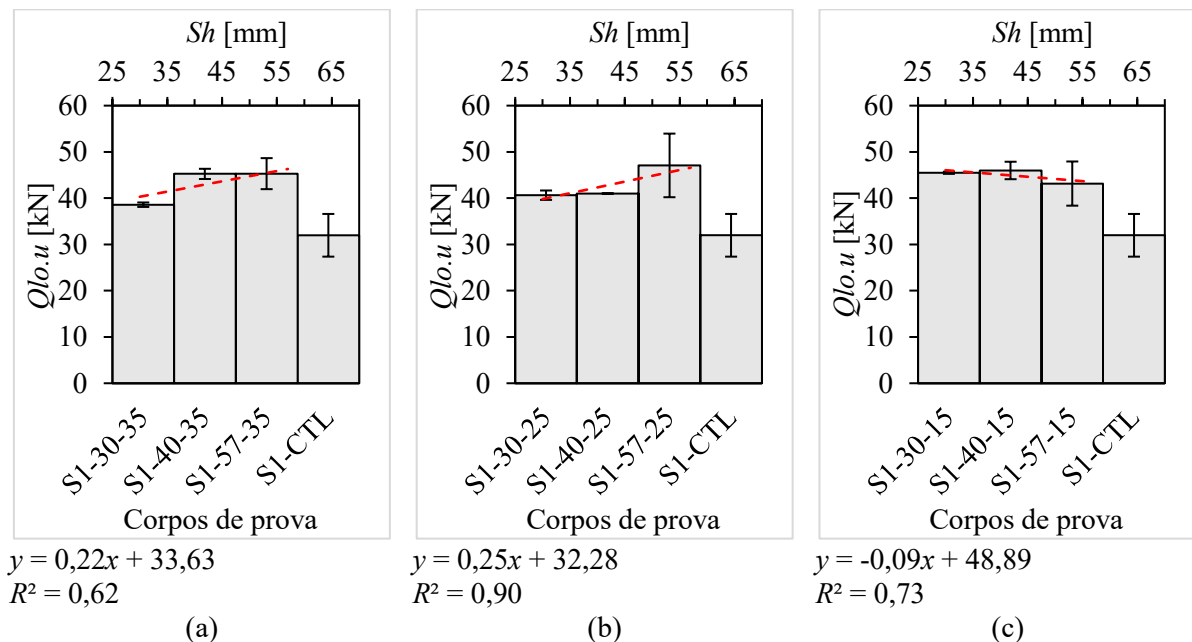


Figura 4.21 – Variação da capacidade última [kN] nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

Na Figura 4.21a ($S_b = 35$ mm), a regressão $y = 0,22x + 33,63$ apresentou um $R^2 = 0,62$, indicando uma correlação moderada entre o aumento de S_h e a elevação da capacidade última. Já na Figura 4.21b ($S_b = 25$ mm), a equação $y = 0,25x + 32,28$ resultou em

um $R^2 = 0,90$, sugerindo um ajuste muito bom e uma tendência positiva mais bem definida. Por outro lado, na Figura 4.21c ($S_b = 15$ mm), a regressão $y = -0,09x + 48,89$ apresentou um $R^2 = 0,73$, indicando uma correlação moderada, mas negativa, o que contraria o comportamento observado nas outras duas configurações.

Apesar de alguns coeficientes de determinação apontarem para modelos bem ajustados, os resultados não revelam um padrão geral consistente que relacione diretamente a capacidade última ao espaçamento entre furos. A comparação com os gráficos da Figura 4.18, que abordam a influência de S_b sobre $Q_{lo,u}$, reforça essa conclusão: os sinais das inclinações e os níveis de correlação mudam entre as diferentes combinações geométricas, indicando que a capacidade última é influenciada por uma interação complexa entre os dois parâmetros geométricos (S_h e S_b), o que limita a eficácia de análises univariadas.

Complementando essa análise, os dados da Tabela 4.7 indicam que a variabilidade dos valores médios de $Q_{lo,u}$ foi, de modo geral, adequada para padrões de engenharia experimental. Em várias configurações, os desvios-padrão permaneceram abaixo de 5 kN e os coeficientes de variação mantiveram-se em níveis aceitáveis, como em S1-30-25 (1,01 kN e 2,49%) e S1-30-15 (0,23 kN e 0,51%). Esses resultados apontam para uma dispersão controlada nos dados experimentais, o que confere maior credibilidade às médias obtidas.

Ainda assim, deve-se considerar que algumas configurações foram compostas por um número reduzido de réplicas, o que pode ter limitado a estabilização estatística dos valores médios. A configuração S1-40-25, por exemplo, contou com apenas uma réplica, enquanto S1-57-25 e S1-30-25 apresentaram apenas duas réplicas válidas. Outras, como S1-57-35, S1-40-15 e S1-30-15, foram compostas por três réplicas, número considerado mínimo para análises comparativas. Embora as dispersões obtidas tenham se mostrado adequadas, a ampliação do número de réplicas em futuras investigações pode contribuir para a consolidação de tendências mais robustas.

A Figura 4.22 amplia a análise do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$), desta vez em função do espaçamento entre furos ($S_h = 30$ mm, 40 mm e 57 mm), mantendo fixas as distâncias entre os furos e a borda interna (S_b) em três valores distintos: (a) 35 mm, (b) 25 mm e (c) 15 mm. A proposta é verificar se existe alguma relação consistente entre S_h e o grau de deformação associado ao pico de carga para diferentes configurações geométricas.

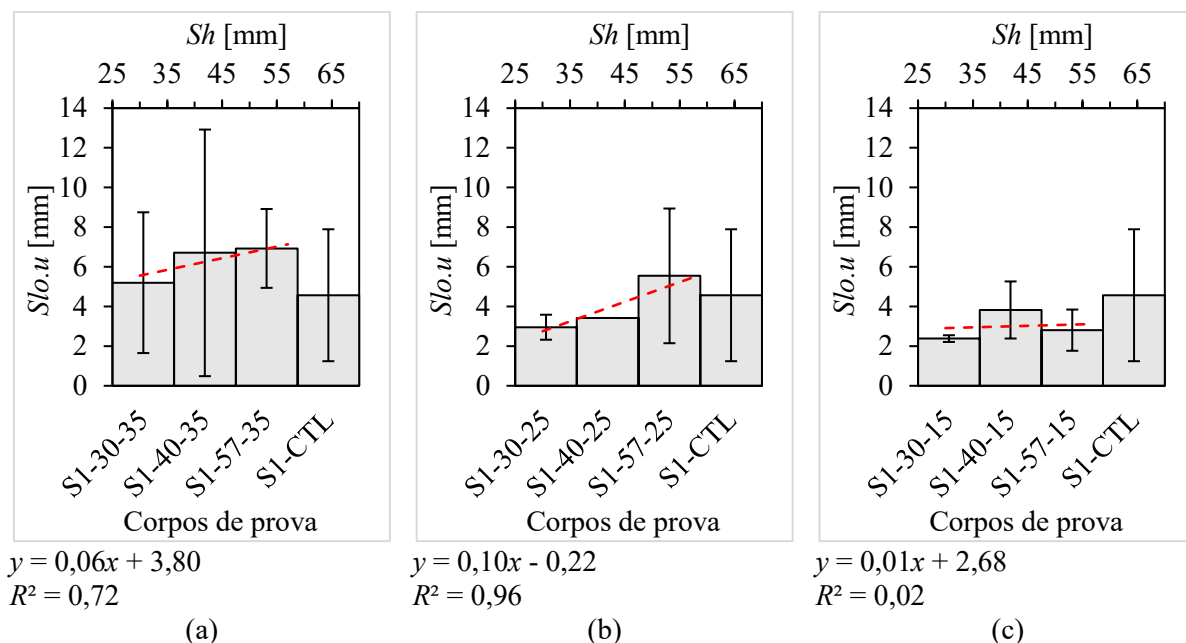


Figura 4.22 – Variação do deslizamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

Na Figura 4.22a ($S_b = 35$ mm), a regressão $y = 0,06x + 3,80$ apresentou um $R^2 = 0,72$, sugerindo uma correlação moderada entre o aumento de S_h e o crescimento de $S_{lo,u}$. A Figura 4.22b ($S_b = 25$ mm) resultou em um ajuste mais expressivo, com a equação $y = 0,10x - 0,22$ e $R^2 = 0,96$, indicando uma forte correlação positiva. Por outro lado, a Figura 4.22c ($S_b = 15$ mm) apresentou uma correlação praticamente inexistente, com $R^2 = 0,02$ e regressão $y = 0,01x + 2,68$, demonstrando que, para esta configuração, o espaçamento entre furos não influenciou de maneira significativa o deslocamento na capacidade última.

Comparando com a Figura 4.19, observa-se que a tendência identificada aqui é menos clara e mais sensível às variações geométricas. Essa instabilidade pode estar associada à variabilidade elevada dos valores de deslocamento, já discutida anteriormente, sobretudo nas configurações com maiores S_b , como S1-40-35 (coeficiente de variação de 92,75%) e S1-57-25 (61,26%), conforme apresentado na Tabela 4.7.

Chama atenção, ainda, o comportamento observado na Figura 4.22c ($S_b = 15$ mm), onde todos os valores médios de deslocamento ficaram abaixo do valor do grupo controle, que foi de 4,57 mm. De acordo com a Tabela 4.7, as médias de $S_{lo,u}$ para S1-57-15, S1-40-15 e S1-30-15 foram, respectivamente, 2,81 mm, 3,82 mm e 2,38 mm, confirmando uma tendência de menor deformação nas configurações com furos mais próximos das bordas internas, mesmo quando comparadas a conectores sem furos. Este comportamento pode indicar uma restrição ao

deslocamento promovida pela menor folga entre os furos e as extremidades, reduzindo a capacidade de acomodação da ligação antes da ruptura.

A rigidez inicial (K_f), sendo o parâmetro mais sensível às condições iniciais do ensaio, frequentemente apresenta dispersões mais acentuadas e comportamentos menos previsíveis. A Figura 4.23 explora sua variação em função do espaçamento entre furos ($S_h = 30$ mm, 40 mm e 57 mm), com agrupamento das curvas por diferentes distâncias entre os furos e a borda interna (S_b): (a) 35 mm, (b) 25 mm e (c) 15 mm. O objetivo é verificar se existe alguma correlação sistemática entre a geometria dos conectores e sua rigidez no início do carregamento.

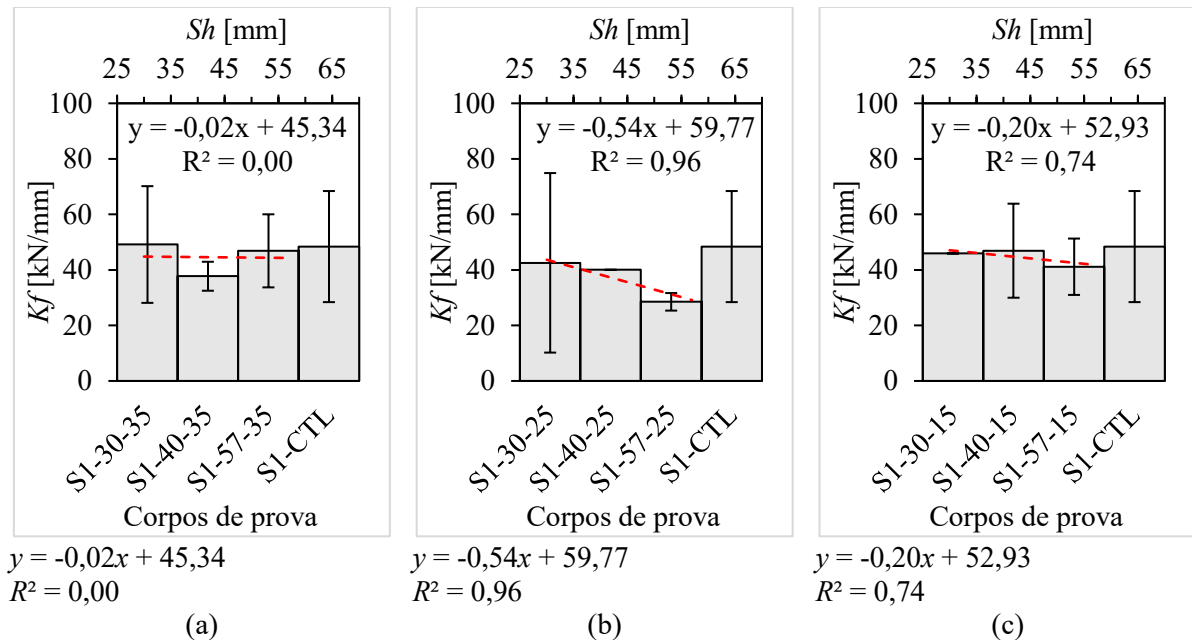


Figura 4.23 – Variação da rigidez inicial[kN/mm] nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

Na Figura 4.23a ($S_b = 35$ mm), o ajuste por regressão $y = -0,02x + 45,34$ apresentou $R^2 = 0,00$, indicando total ausência de correlação entre S_h e K_f nesse conjunto de dados. Já a Figura 4.23b ($S_b = 25$ mm) resultou em $y = -0,54x + 59,77$, com $R^2 = 0,96$, o que sugere uma forte correlação negativa, com redução da rigidez inicial à medida que aumenta o espaçamento entre furos. Por fim, na Figura 4.23c ($S_b = 15$ mm), a regressão $y = -0,20x + 52,93$ apresentou $R^2 = 0,74$, indicando uma correlação moderada negativa. Seguindo o padrão adotado neste trabalho, todas as equações de regressão e os respectivos coeficientes de determinação foram apresentados com duas casas decimais.

Esse comportamento reflete o que já havia sido observado na Figura 4.20: não há um padrão claro e generalizável que relacione o espaçamento entre furos com a rigidez inicial dos conectores. A sensibilidade desse parâmetro a pequenas variações no contato entre materiais, na regularidade da interface e no assentamento inicial torna os modelos ajustados menos estáveis e mais dependentes de condições específicas de cada grupo.

A própria Tabela 4.7 reforça essa conclusão, ao evidenciar altos coeficientes de variação para diversas configurações. Por exemplo, S1-30-35 e S1-30-25 apresentaram coeficientes de variação de 42,78% e 51,59%, respectivamente, mesmo com médias elevadas de rigidez (49,15 e 42,55 kN/mm). Esses índices confirmam que a dispersão nos dados de K_f é significativamente maior que aquela observada para $Q_{lo,u}$ e $S_{lo,u}$.

Outro ponto que merece destaque é o desempenho do grupo controle (S1-CTL), que apresentou uma rigidez inicial média de 48,40 kN/mm, valor compatível com os maiores obtidos nas demais configurações. Esse comportamento pode estar relacionado à ausência de furos, o que contribui para uma seção transversal mais íntegra, aumentando a resistência à deformação nas fases iniciais do carregamento. Além disso, o confinamento do conector sem furos no concreto pode ter favorecido o atrito e a rigidez antes do início do deslizamento significativo.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados consolidados dos três principais parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios da Série 1: capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f). Os dados estão agrupados por espaçamento entre furos ($S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm), independentemente da distância entre furos e a borda interna (S_b), permitindo uma visão mais abrangente dos efeitos de S_h sobre o desempenho dos conectores.

Em relação à capacidade última, os valores médios observados foram de 45,43 kN para conectores com $S_h = 57$ mm, 44,96 kN para $S_h = 40$ mm e 41,44 kN para $S_h = 30$ mm. Esses resultados indicam uma leve tendência de redução da resistência com a diminuição do espaçamento entre furos. A dispersão dos dados foi moderada, com coeficientes de variação de 10,47% para $S_h = 57$ mm, 4,86% para $S_h = 40$ mm e 7,19% para $S_h = 30$ mm, o que demonstra boa repetibilidade entre réplicas, dentro dos padrões geralmente aceitos em experimentação estrutural.

No que se refere ao deslocamento na capacidade última, verificam-se médias de 5,38 mm para $S_h = 57$ mm, 5,00 mm para $S_h = 40$ mm e 3,43 mm para $S_h = 30$ mm. Há uma tendência clara de redução dos deslizamentos à medida que os furos se aproximam, o que pode indicar um comportamento menos dúctil dos conectores com menor S_h . Esse parâmetro, por sua

natureza, apresentou variabilidade mais elevada, com coeficientes de variação de 50,96%, 80,34% e 56,53% para os respectivos grupos.

A rigidez inicial (K_f) apresentou médias de 38,55 kN/mm, 41,99 kN/mm e 45,40 kN/mm para $S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm, respectivamente. A ligeira elevação de K_f com a redução de S_h pode estar associada à limitação do deslocamento inicial imposta pela geometria mais concentrada dos furos. Ainda assim, a dispersão dos dados permaneceu elevada, com coeficientes de variação de 30,90%, 26,79% e 34,34%, refletindo a já esperada sensibilidade desse parâmetro às condições iniciais de apoio, aderência e variabilidade na interface entre concreto e GFRP.

Tabela 4.8 – Capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Código	$Q_{lo,u}$				$S_{lo,u}$				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	48,86				5,18				44,57			
S1-57-35-B	44,84				9,09				35,01			
S1-57-35-C	42,20				6,51				61,02			
S1-57-25-A	52,40	45,43	4,76	10,47	9,39	5,38	2,74	50,96	26,61	38,55	11,91	30,90
S1-57-25-2	49,52				4,28				32,15			
S1-57-25-C	39,32				2,96				26,74			
S1-57-15-A	46,53				3,54				48,32			
S1-57-15-B	39,78				2,07				33,96			
S1-40-35-A	44,00				13,88				36,62			
S1-40-35-B	46,08				2,95				33,14			
S1-40-35-C	45,66				3,28				43,40			
S1-40-25-A	41,00	44,96	2,18	4,86	3,42	5,00	4,02	80,34	40,03	41,99	11,25	26,79
S1-40-15-A	43,82				2,56				64,27			
S1-40-15-B	46,86				3,52				30,43			
S1-40-15-C	47,28				5,39				46,05			
S1-30-35-A	38,93				2,69				34,28			
S1-30-35-B	38,25				7,71				64,01			
S1-30-25-A	39,48				3,05				32,33			
S1-30-25-B	41,31	41,44	2,98	7,19	3,53	3,43	1,94	56,53	27,57	45,40	15,59	34,34
S1-30-25-C	41,15				2,28				67,75			
S1-30-15-A	45,32				2,50				46,06			
S1-30-15-B	45,65				2,26				45,83			
S1-CTL-A	27,47				0,79				45,59			
S1-CTL-B	31,77	31,98	4,61	14,43	7,06	4,57	3,33	72,84	29,95	48,40	20,00	41,33
S1-CTL-C	36,69				5,85				69,66			

O grupo controle (S1-CTL), formado por conectores sem furos, apresentou comportamento distinto. A capacidade última média foi de 31,98 kN, significativamente inferior à observada nas configurações com furos. O deslocamento na capacidade última, por sua vez, foi de 4,57 mm, valor intermediário em relação às demais configurações. Já a rigidez inicial média foi de 48,40 kN/mm, uma das mais elevadas da série. Este desempenho pode ser atribuído à integridade da seção transversal do conector, sem interrupções por perfurações, o que favorece maior resistência à deformação nos estágios iniciais do carregamento.

Dando sequência à análise dos parâmetros mecânicos apresentados na Tabela 4.8, a Figura 4.24 mostra a variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$), do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e da rigidez inicial (K_f) em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). Neste agrupamento, os valores médios foram calculados com base em um número maior de réplicas para cada valor de S_h , o que confere maior representatividade estatística aos dados e mais estabilidade aos modelos de regressão apresentados.

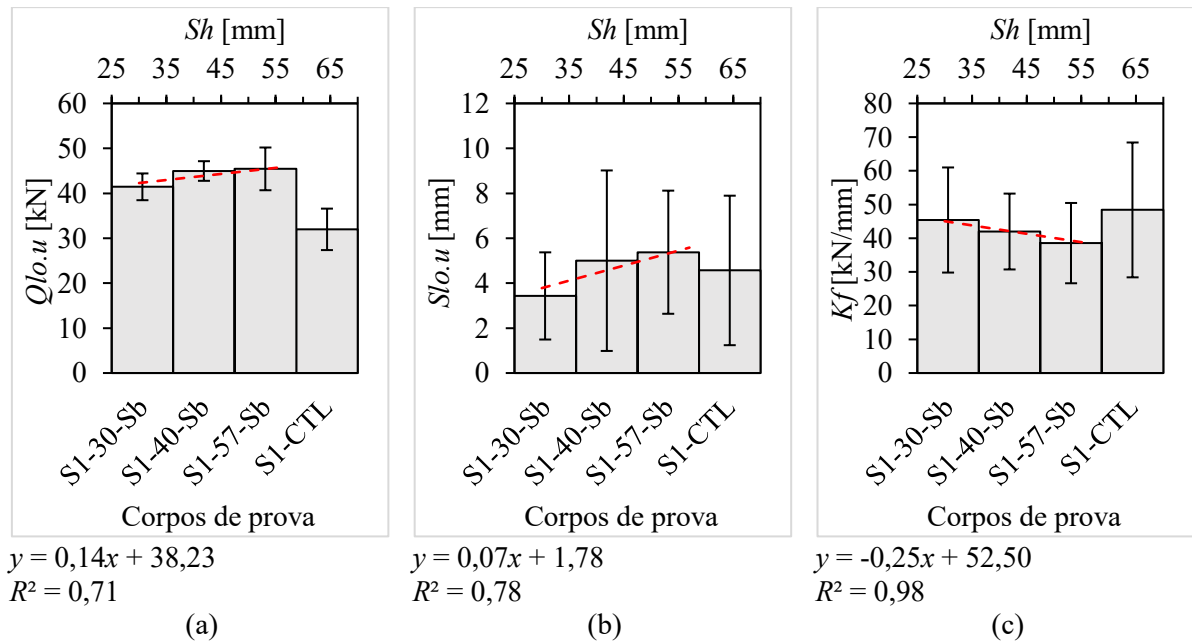


Figura 4.24 – Variação da (a) capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e (c) rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1, por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Na Figura 4.24a, a regressão da capacidade última resultou em $y = 0,14x + 38,23$, com $R^2 = 0,71$, sugerindo uma correlação moderada e positiva entre o espaçamento entre furos e a força máxima suportada pelos conectores. Essa tendência já havia sido parcialmente observada em algumas configurações da Figura 4.18, embora ali os coeficientes de

determinação fossem, em sua maioria, baixos e os sinais das inclinações variados, o que dificultava a identificação de um padrão claro. O número reduzido de réplicas por configuração nas análises da Figura 4.18 pode ter contribuído para a inconsistência dos modelos. Já a consolidação apresentada na Figura 4.24 permite observar com maior clareza a tendência de aumento da capacidade última com o aumento de S_h .

Na Figura 4.24b, o deslocamento na capacidade última também apresentou uma tendência crescente em função de S_h , com regressão $y = 0,07x + 1,78$ e $R^2 = 0,78$. Esse comportamento reforça os indícios apontados na Figura 4.19, na qual se observou aumento de $S_{lo,u}$ para valores maiores de S_b . Apesar disso, os elevados coeficientes de variação reportados na Tabela 4.8 para esse parâmetro, sobretudo em $S_h = 40$ mm (80,34%) e $S_h = 57$ mm (50,96%), indicam que esse resultado deve ser interpretado com cautela. Ainda que a média sugira um crescimento, a dispersão significativa entre as réplicas evidencia a influência de fatores experimentais e geométricos adicionais.

Na Figura 4.24c, a rigidez inicial apresentou uma regressão decrescente ($y = -0,25x + 52,50$), com $R^2 = 0,98$, o que aponta para uma forte correlação negativa entre S_h e K_f . Esse resultado, no entanto, contrasta com os achados da Figura 4.20, na qual não foi identificado um padrão consistente entre K_f e S_b . Naquela análise, duas das três regressões apresentaram baixos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,09$ e $R^2 = 0,24$) e inclinações com sinais opostos, indicando ausência de correlação confiável. Assim, o forte ajuste observado na Figura 4.24 parece decorrer da maior quantidade de réplicas agrupadas por S_h , o que reduziu o efeito da variabilidade entre configurações e permitiu a identificação de uma tendência mais nítida.

De modo geral, a Figura 4.24 apresenta modelos mais consistentes do que os observados na Figura 4.18, na Figura 4.19 e na Figura 4.20. Isso se deve principalmente ao maior número de dados considerados por grupo, o que permite maior estabilidade estatística. Ao mesmo tempo, as comparações com as figuras anteriores revelam que a interpretação isolada de S_h ou S_b deve ser feita com cautela, pois os efeitos de cada parâmetro geométrico podem se sobrepor ou interagir. A abordagem adotada nesta etapa, ao considerar o comportamento médio por S_h , oferece uma leitura complementar importante, permitindo destacar tendências gerais mesmo em meio à variabilidade natural dos dados experimentais.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos obtidos para os conectores da Série 1, agora agrupados por distância entre os furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h). Assim como na Tabela 4.8, optou-se por incluir novamente os valores individuais de cada espécime, mesmo à

custa de certa repetição, com o intuito de manter a transparência e permitir uma leitura detalhada dos dados que subsidiam os resultados médios apresentados.

Com relação à capacidade última ($Q_{lo.u}$), os valores médios obtidos para os conectores com $S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm foram, respectivamente, 43,60 kN, 43,45 kN e 45,03 kN. Esses resultados indicam valores relativamente próximos entre si, sem uma tendência clara de aumento ou redução conforme a variação de S_b . Os coeficientes de variação foram 8,32% para $S_b = 35$ mm, 12,09% para $S_b = 25$ mm e 5,74% para $S_b = 15$ mm, revelando boa repetibilidade experimental, especialmente na menor distância, ainda que os valores estejam dentro da faixa esperada para esse tipo de ensaio.

Quanto ao deslocamento na capacidade última ($S_{lo.u}$), observou-se maior dispersão entre os dados. As médias foram de 6,41 mm ($S_b = 35$ mm), 4,13 mm ($S_b = 25$ mm) e 3,12 mm ($S_b = 15$ mm), apontando para uma tendência de redução da ductilidade à medida que os furos se aproximam das bordas internas dos conectores. Esta tendência está de acordo com as análises feitas anteriormente na Figura 4.19 e na Figura 4.22. No entanto, os coeficientes de variação foram significativamente elevados, atingindo 59,48% para $S_b = 35$ mm e 58,07% para $S_b = 25$ mm, o que sugere que, apesar da tendência observada, a variabilidade do parâmetro limita a precisão estatística dos modelos.

A análise da rigidez inicial (K_i) revelou médias de 44,01 kN/mm ($S_b = 35$ mm), 36,17 kN/mm ($S_b = 25$ mm) e 44,99 kN/mm ($S_b = 15$ mm). Os resultados mostram um comportamento menos regular, sem uma relação direta clara entre a rigidez e a posição dos furos em relação à borda. Os coeficientes de variação, embora elevados, ficaram dentro do intervalo esperado para esse tipo de parâmetro, sendo de 27,68% para $S_b = 35$ mm, 40,66% para $S_b = 25$ mm e 24,34% para $S_b = 15$ mm. Essa dispersão já havia sido observada na Figura 4.20 e na Figura 4.23, indicando a sensibilidade da rigidez inicial a fatores locais como interface, aderência e resposta inicial do conjunto.

O grupo controle (S1- C_{TL}), como nas análises anteriores, apresentou desempenho distinto, com menor capacidade última média (31,98 kN) e rigidez inicial relativamente elevada (48,40 kN/mm). Esses resultados confirmam a influência da ausência de furos na resposta global do conector, aumentando sua rigidez inicial, mas limitando a sua capacidade resistente total. O deslocamento médio de 4,57 mm se manteve em patamar intermediário.

Tabela 4.9 – Capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Código	$Q_{lo,u}$				$S_{lo,u}$				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	48,86				5,18				44,57			
S1-57-35-B	44,84				9,09				35,01			
S1-57-35-C	42,20				6,51				61,02			
S1-40-35-A	44,00	43,60	3,63	8,32	13,88	6,41	3,81	59,48	36,62	44,01	12,18	27,68
S1-40-35-B	46,08				2,95				33,14			
S1-40-35-C	45,66				3,28				43,40			
S1-30-35-A	38,93				2,69				34,28			
S1-30-35-B	38,25				7,71				64,01			
S1-57-25-A	52,40				9,39				26,61			
S1-57-25-2	49,52				4,28				32,15			
S1-57-25-C	39,32				2,96				26,74			
S1-40-25-A	41,00	43,45	5,25	12,09	3,42	4,13	2,40	58,07	40,03	36,17	14,70	40,66
S1-30-25-A	39,48				3,05				32,33			
S1-30-25-B	41,31				3,53				27,57			
S1-30-25-C	41,15				2,28				67,75			
S1-57-15-A	46,53				3,54				48,32			
S1-57-15-B	39,78				2,07				33,96			
S1-40-15-A	43,82				2,56				64,27			
S1-40-15-B	46,86	45,03	2,59	5,74	3,52	3,12	1,16	37,08	30,43	44,99	10,95	24,34
S1-40-15-C	47,28				5,39				46,05			
S1-30-15-A	45,32				2,50				46,06			
S1-30-15-B	45,65				2,26				45,83			
S1-CTL-A	27,47				0,79				45,59			
S1-CTL-B	31,77	31,98	4,61	14,43	7,06	4,57	3,33	72,84	29,95	48,40	20,00	41,33
S1-CTL-C	36,69				5,85				69,66			

De forma geral, a Tabela 4.9 confirma tendências previamente observadas nos gráficos e tabelas anteriores. Ainda que a apresentação repetida dos dados individuais implique em maior volume de informações, ela reforça a transparência do tratamento estatístico adotado e sustenta, com base empírica, as análises de regressão realizadas ao longo do subcapítulo.

Complementando a análise estatística apresentada na Tabela 4.9, a Figura 4.25 representa graficamente a variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$), do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e da rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1, em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), considerando os dados agrupados independentemente do espaçamento entre furos (S_h). A organização dos resultados por S_b permite observar, com maior clareza, as tendências médias de comportamento associadas exclusivamente a esse parâmetro geométrico.

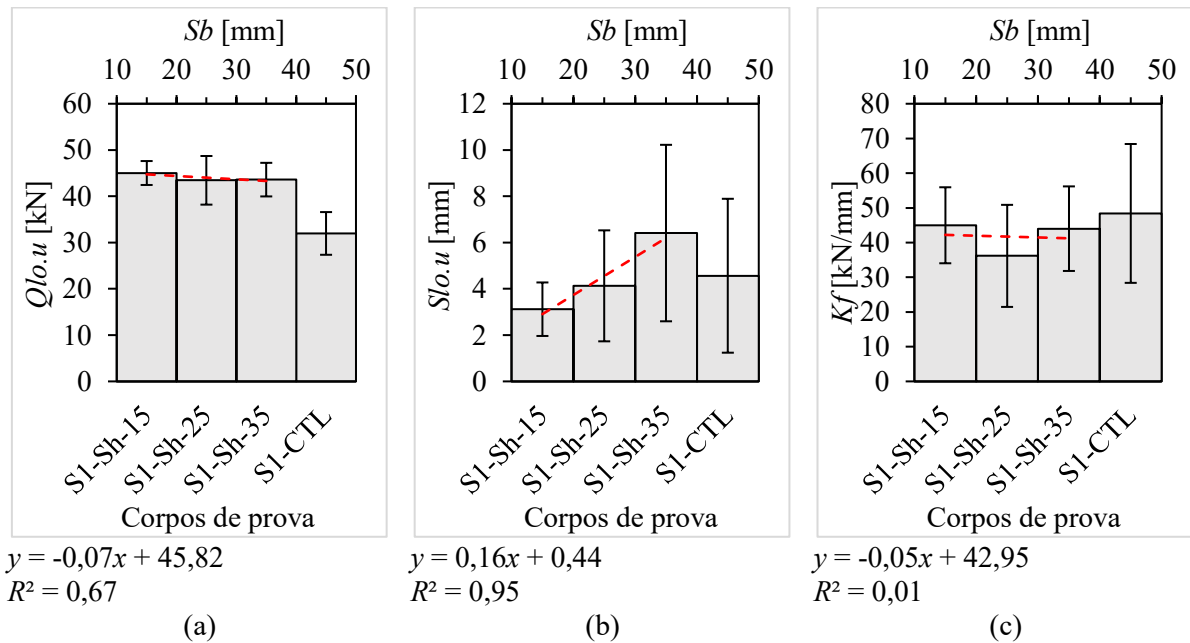


Figura 4.25 – Variação (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e (c) da rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 1, por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Na Figura 4.25a, observa-se uma leve tendência decrescente da capacidade última com o aumento de S_b , representada pela regressão linear $y = -0,07x + 45,82$ e $R^2 = 0,67$. Embora o coeficiente de determinação aponte para uma correlação moderada, a inclinação da curva é sutil, e a análise dos dados individuais sugere que a capacidade última não varia significativamente entre as diferentes posições dos furos. Esse comportamento está em consonância com os resultados apresentados na Figura 4.18, que também não revelaram um padrão claro ou consistente na relação entre $Q_{lo,u}$ e S_b .

O gráfico da Figura 4.25b confirma a tendência previamente identificada de aumento do deslocamento na capacidade última com o afastamento dos furos em relação à borda interna. A regressão $y = 0,16x + 0,44$ apresenta um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,95$), evidenciando que valores maiores de S_b favorecem um comportamento mais dúctil. Este resultado reforça o que havia sido apontado na Figura 4.22, com a diferença de que, nesta análise, o número de réplicas é maior, o que confere mais robustez estatística à tendência observada.

Por outro lado, a rigidez inicial (Figura 4.25c) não apresentou relação significativa com a distância entre os furos e a borda interna. A regressão $y = -0,05x + 42,95$ teve um coeficiente de determinação de apenas $R^2 = 0,01$, indicando ausência de correlação. Esse resultado é compatível com os modelos ajustados na Figura 4.20, em que também se verificaram baixos valores de R^2 e ausência de um padrão sistemático. A variabilidade observada nos valores de K_f , tanto na Tabela 4.9 quanto nos gráficos anteriores, reforça que esse parâmetro é altamente sensível a fatores locais, como condições de interface e assentamento inicial, e não a variações geométricas simples como S_b .

De forma geral, os resultados da Figura 4.25 corroboram os achados anteriores, especialmente no que diz respeito ao deslocamento na capacidade última, que se mostrou o parâmetro mais sensível às variações de S_b . Já a capacidade última apresentou comportamento relativamente estável, e a rigidez inicial se manteve como o parâmetro mais disperso e com menor relação estatística com os aspectos geométricos analisados.

De maneira geral, a análise dos parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios da Série 1 permite concluir que a capacidade última se manteve relativamente estável entre as diferentes configurações geométricas de conectores, com variações pouco expressivas entre os grupos e dispersões compatíveis com os padrões esperados para ensaios experimentais. O deslocamento na capacidade última, por sua vez, apresentou maior sensibilidade à variação dos parâmetros geométricos, especialmente à distância entre os furos e a borda interna (S_b), evidenciando uma correlação positiva mais clara nos modelos com maior número de réplicas. Já a rigidez inicial se destacou como o parâmetro mais disperso e menos correlacionado com os aspectos geométricos analisados, o que pode ser atribuído à sua dependência de fatores experimentais de difícil controle, como a qualidade do contato entre conector e concreto, o assentamento inicial e o comportamento das interfaces no início do carregamento. A consolidação dos resultados por agrupamentos independentes de S_h e S_b permitiu isolar os efeitos de cada parâmetro geométrico, facilitando a identificação de tendências relevantes que

serão aprofundadas nas análises de rigidez elástica, rigidez inelástica e comportamento global dos conectores nas seções seguintes.

4.2.3.2 *Energia absoluta absorvida e energia relativa absorvida*

A quantificação da energia absorvida pelos conectores durante os ensaios permite uma avaliação mais completa do seu desempenho estrutural, indo além dos parâmetros clássicos de resistência e rigidez. Neste tópico, são analisadas duas grandezas derivadas das curvas força versus deslizamento relativo: a energia absoluta absorvida (W_{abs}), que corresponde à área total sob a curva até o fim do ensaio, e a energia relativa absorvida (W_{rel}), que normaliza esse valor pela respectiva carga máxima ($Q_{lo,u}$) de cada conector. A energia absoluta reflete a capacidade global de um conector em absorver deformações ao longo do carregamento, enquanto a energia relativa representa a deformabilidade específica por unidade de carga máxima, servindo como um indicador da ductilidade relativa do sistema. Ambas as variáveis foram obtidas conforme metodologia descrita no item “3.5 Processamento dos dados” e contribuem para a caracterização do comportamento pós-pico dos conectores.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados individuais, as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação da energia absoluta (W_{abs}) e da energia relativa (W_{rel}) para cada configuração da Série 1. Os dados indicam que as maiores médias de W_{abs} foram obtidas nos conectores com maiores distâncias entre furos e bordas internas, como o S1-57-35 (526,28 kN·mm) e o S1-57-25 (488,57 kN·mm), refletindo um comportamento mais tenaz nessas configurações. Em contraste, os conectores S1-57-15 (331,97 kN·mm) e S1- C_{TL} (371,67 kN·mm) apresentaram os menores valores, o que indica menor capacidade de absorção de deformações durante o carregamento.

A energia relativa (W_{rel}) reforça essa tendência ao evidenciar conectores com maior capacidade de deformação específica associada à carga máxima suportada. Os maiores valores foram observados nos conectores S1-57-35 (11,64 kN·mm/kN), S1-30-35 (10,47 kN·mm/kN) e S1- C_{TL} (11,61 kN·mm/kN). Vale destacar que, embora o grupo controle tenha apresentado uma energia absoluta inferior à de diversos conectores com furos, seu valor de W_{rel} foi elevado, o que sugere um bom desempenho relativo em termos de ductilidade, mesmo com menor resistência máxima.

Tabela 4.10 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 1: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN·mm]	$\bar{x}$ [kN·mm]	s [kN·mm]	c_v [%]	x_n [kN·mm/kN]	$\bar{x}$ [kN·mm/kN]	s [kN·mm/kN]	c_v [%]
S1-57-35-A	558,64				11,43			
S1-57-35-B	490,69	526,28	34,09	6,48	10,94	11,64	0,82	7,06
S1-57-35-C	529,51				12,55			
S1-57-25-A	555,21				10,60			
S1-57-25-2	491,89	488,57	68,37	13,99	9,93	10,39	0,40	3,83
S1-57-25-C	418,60				10,65			
S1-57-15-A	367,29				7,89			
S1-57-15-B	296,64	331,97	49,96	15,05	7,46	7,68	0,31	4,02
S1-40-35-A	519,77				11,81			
S1-40-35-B	365,85	441,32	77,00	17,45	7,94	9,78	1,94	19,86
S1-40-35-C	438,33				9,60			
S1-40-25-A	382,72	382,72	–	–	9,33	9,33	–	–
S1-40-15-A	359,40				8,20			
S1-40-15-B	404,60	391,15	27,61	7,06	8,63	8,50	0,26	3,03
S1-40-15-C	409,46				8,66			
S1-30-35-A	424,44				10,90			
S1-30-35-B	383,61	404,03	28,87	7,15	10,03	10,47	0,62	5,90
S1-30-25-A	349,28				8,85			
S1-30-25-B	344,35	361,84	26,15	7,23	8,34	8,90	0,60	6,69
S1-30-25-C	391,90				9,52			
S1-30-15-A	351,26				7,75			
S1-30-15-B	359,52	355,39	5,84	1,64	7,88	7,81	0,09	1,13
S1-CTL-A	300,86				10,95			
S1-CTL-B	398,55	371,67	61,91	16,66	12,54	11,61	0,83	7,17
S1-CTL-C	415,59				11,33			

Em termos de variabilidade, a energia absoluta absorvida apresentou coeficientes de variação geralmente baixos a moderados, com destaque para S1-30-15-r, cuja dispersão foi de apenas 1,64%, e S1-57-15, com 15,05%. Os valores de W_{rel} , por sua vez, apresentaram baixos coeficientes de variação em praticamente todas as configurações, frequentemente inferiores a 7%, o que demonstra boa consistência experimental e reprodutibilidade dos ensaios nesse parâmetro.

De forma geral, os resultados da Tabela 4.10 indicam que os conectores com maiores afastamentos dos furos em relação às bordas internas absorvem mais energia ao longo do ensaio, o que pode estar associado a trajetórias de fissuração mais longas e maior liberdade para deformações. A análise da energia relativa complementa essa interpretação ao evidenciar quais conectores apresentaram comportamento mais dúctil em termos proporcionais à sua capacidade resistente, contribuindo para a compreensão do desempenho global das diferentes geometrias analisadas.

A Figura 4.26 amplia a análise apresentada na Tabela 4.10 ao representar graficamente a variação da energia absoluta absorvida (W_{abs}) em função da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b), para os três valores de espaçamento entre furos ($S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm). A consolidação dos dados por grupo geométrico possibilita observar tendências mais claras, especialmente em relação à contribuição de S_b na dissipação de energia ao longo dos ensaios.

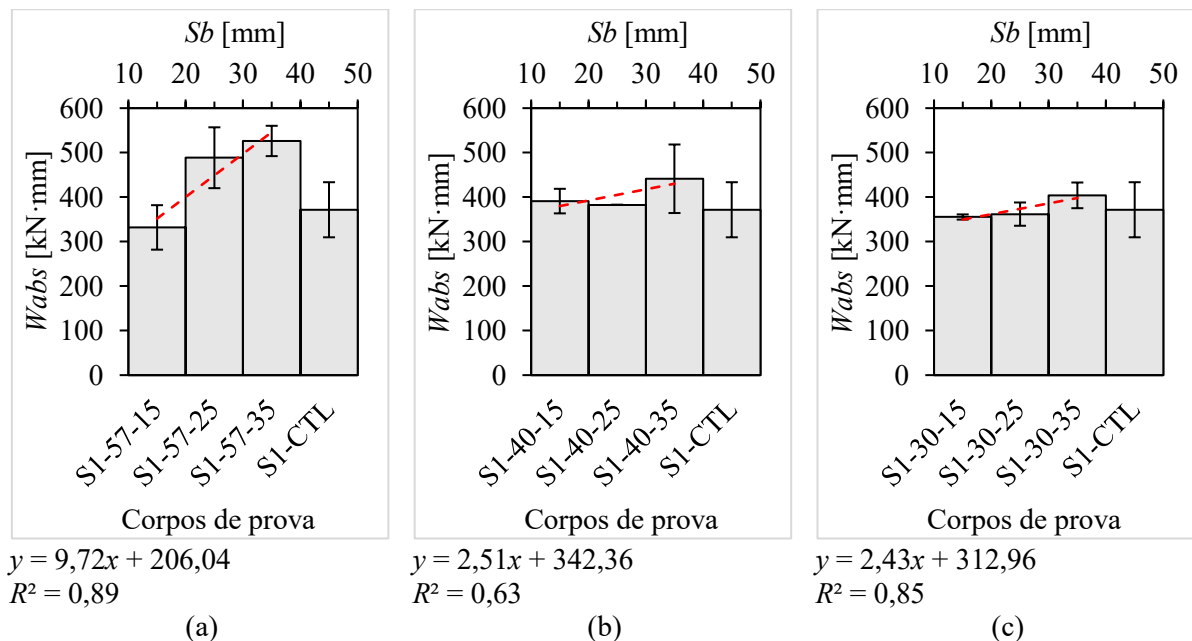


Figura 4.26 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furo e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Entre as três configurações, a mais expressiva é a da Figura 4.26a ($S_h = 57$ mm), cuja regressão linear apresenta equação $y = 9,72x + 206,04$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,89$, classificado como bom. A inclinação acentuada e o alto R^2 indicam que o aumento de S_b contribuiu diretamente para elevações significativas na energia acumulada, o que é coerente com o que foi observado na Tabela 4.10, em que as maiores médias de W_{abs} estavam associadas às configurações S1-57-35 e S1-57-25.

No caso de $S_h = 40$ mm (Figura 4.26b), a tendência de crescimento permanece, mas com menor intensidade. A equação $y = 2,51x + 342,36$ e o coeficiente $R^2 = 0,63$, classificado como fraco, revelam que, embora exista uma variação positiva de W_{abs} com o aumento de S_b , a dispersão dos dados reduz a qualidade do modelo. Esse comportamento pode estar associado a uma menor sensibilidade da geometria nesse intervalo específico de S_h , ou à interferência de outras variáveis experimentais que atuam de forma mais pronunciada quando o espaçamento entre furos não é tão elevado.

Já na configuração com $S_h = 30$ mm (Figura 4.26c), observa-se uma tendência semelhante à de $S_h = 40$ mm em termos de inclinação ($y = 2,43x + 312,96$), porém com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,85$, classificado como bom. Isso indica que, mesmo em conectores com menor espaçamento entre furos, o afastamento dos furos em relação à borda interna do conector ainda se mostra um fator determinante para a capacidade de absorção de energia.

De forma geral, a Figura 4.26 confirma a tendência de que valores mais elevados de S_b favorecem maior acúmulo de energia durante os ensaios, sobretudo em configurações com S_h mais afastado, como no caso de 57 mm. A variação entre os coeficientes de determinação sugere que essa relação é mais forte em algumas geometrias do que em outras, e que o comportamento dos conectores resulta de uma interação entre múltiplos parâmetros. Ainda assim, os modelos ajustados reforçam o papel de S_b como uma variável relevante na definição do comportamento ductilizado dos conectores, especialmente no que diz respeito à sua capacidade de deformação acumulada até o fim do carregamento.

A Figura 4.27 apresenta a variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), para os três valores de espaçamento entre furos analisados: 57 mm, 40 mm e 30 mm. A energia relativa, por ser normalizada pela carga máxima, permite avaliar a capacidade dos conectores de absorver deformações de forma proporcional à sua resistência, funcionando como um indicador adicional do nível de ductilidade apresentado por cada configuração.

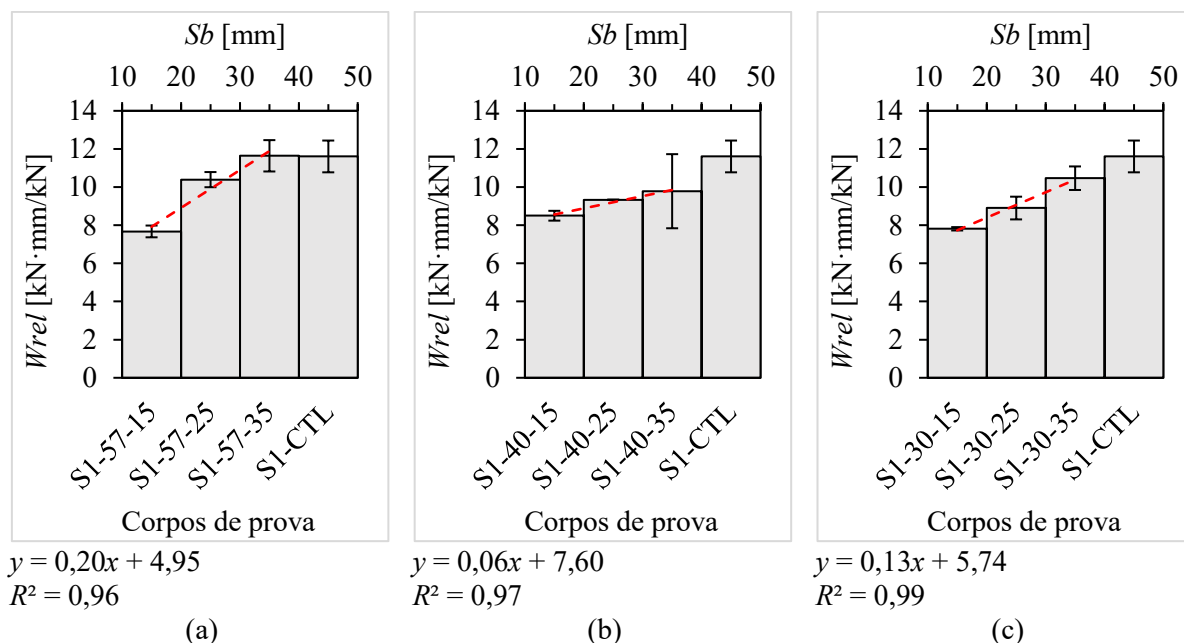


Figura 4.27 – Variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furo e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Os resultados indicam uma tendência crescente bastante consistente entre W_{rel} e S_b , com modelos de regressão linear que apresentaram coeficientes de determinação elevados em todas as configurações: $R^2 = 0,96$ para $S_h = 57$ mm ($y = 0,20x + 4,95$), $R^2 = 0,97$ para $S_h = 40$ mm ($y = 0,06x + 7,60$) e $R^2 = 0,99$ para $S_h = 30$ mm ($y = 0,13x + 5,74$). Esses resultados revelam que a distância entre os furos e a borda interna influencia de maneira clara e regular o aumento da energia relativa absorvida, independentemente do valor do espaçamento entre furos. A forte correlação estatística encontrada nessas análises demonstra que W_{rel} é um parâmetro robusto e sensível às variações geométricas dos conectores.

Diferentemente do que se observou na análise da energia absoluta (Figura 4.26), onde a qualidade dos ajustes variou conforme a configuração, a energia relativa apresentou comportamento sistemático e previsível. Isso se deve, em parte, ao fato de que a normalização pela carga máxima reduz o impacto de variações entre réplicas, especialmente em ensaios com dispersões naturais nos valores de pico de carga.

De modo geral, a Figura 4.27 evidencia que o afastamento dos furos em relação à borda interna melhora a capacidade de deformação relativa dos conectores, sendo esse efeito verificado de forma recorrente nas configurações analisadas. A consistência dos modelos ajustados reforça o papel de S_b como uma variável geométrica com impacto direto sobre a ductilidade dos sistemas avaliados, e destaca W_{rel} como um parâmetro confiável para análise comparativa entre diferentes configurações.

A Figura 4.28 apresenta a variação da energia absoluta absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos ($S_h = 30$ mm, 40 mm e 57 mm), para três valores distintos de distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm). Essa abordagem complementa a análise da Figura 4.26, invertendo o parâmetro de agrupamento: enquanto a Figura 4.26 fixava S_h e variava S_b , aqui S_b é mantido constante em cada gráfico, permitindo observar os efeitos isolados do espaçamento entre furos sobre a energia acumulada ao longo dos ensaios.

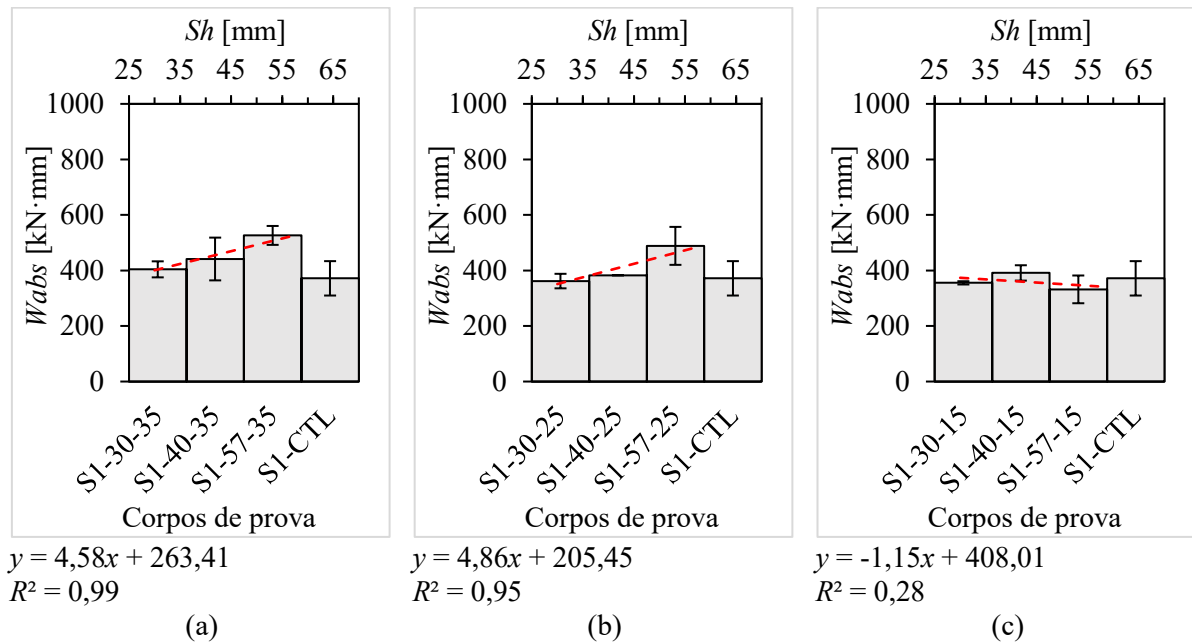


Figura 4.28 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

A Figura 4.28a ($S_b = 35$ mm) apresenta uma tendência fortemente crescente da energia absoluta com o aumento de S_h , com modelo linear definido por $y = 4,58x + 263,41$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, classificado como excelente. Esse resultado confirma que, quando os furos estão afastados da borda interna e entre si, há maior liberdade para o desenvolvimento de fissuras e deformações, o que resulta em maior absorção de energia. A Figura 4.28b ($S_b = 25$ mm) exibe comportamento semelhante, com modelo $y = 4,86x + 205,45$ e $R^2 = 0,95$, também indicando forte correlação. Embora os valores de W_{abs} sejam um pouco menores do que no caso anterior, a tendência de crescimento com o aumento de S_h permanece clara e bem ajustada ao modelo proposto.

Por outro lado, a Figura 4.28c ($S_b = 15$ mm) apresenta uma resposta oposta. O modelo $y = -1,15x + 408,01$ tem $R^2 = 0,28$, indicando baixa correlação entre os dados e o ajuste

linear. A inclinação negativa sugere uma leve tendência de queda de W_{abs} com o aumento do espaçamento entre furos, embora a baixa qualidade do modelo impeça uma conclusão consistente. Esse comportamento destoante pode estar relacionado ao fato de que, com furos muito próximos da borda interna, o efeito do espaçamento entre furos se torna menos relevante, dado que as fissuras se concentram mais rapidamente entre a borda e o furo adjacente, limitando a dissipação de energia ao longo do conector.

Comparando com a Figura 4.26, percebe-se que os efeitos de S_h sobre W_{abs} são mais evidentes quando S_b é maior. Na Figura 4.26, as melhores correlações ocorreram para $S_h = 57$ mm e 30 mm, mas com R^2 inferiores aos obtidos aqui, com exceção da configuração $S_b = 15$ mm. Isso indica que o espaçamento entre furos (S_h) é uma variável que, quando analisada dentro de um contexto geométrico com maior distância à borda (S_b), influencia de forma mais clara e contínua a energia total absorvida pelos conectores.

Esses resultados reforçam que o desempenho em termos de absorção de energia dos conectores está condicionado à interação entre os dois parâmetros geométricos, S_h e S_b , e que o aumento de ambos tende a favorecer trajetórias de fissuração mais longas e um comportamento mais gradual durante o carregamento, desde que respeitados limites mínimos de afastamento para evitar colapsos prematuros ou concentração excessiva de tensões.

A Figura 4.29 apresenta a variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) em função da distância entre furos (S_h), para três valores fixos de distância entre os furos e a borda interna ($S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm). Essa abordagem permite avaliar se o espaçamento entre furos afeta de maneira proporcional a capacidade dos conectores de absorver deformações em relação à carga máxima, ou seja, sua ductilidade relativa. A análise se complementa às interpretações realizadas na Figura 4.28 ($W_{abs} \times S_h$) e na Figura 4.27 ($W_{rel} \times S_b$).

Nos casos com $S_b = 35$ mm (Figura B.2a) e $S_b = 25$ mm (Figura B.2b), observa-se uma clara tendência de crescimento de W_{rel} com o aumento de S_h . As regressões apresentaram altos coeficientes de determinação, $R^2 = 0,99$ para o modelo $y = 0,09x + 5,39$, e $R^2 = 0,95$ para $y = 0,10x + 4,20$, respectivamente, ambos classificados como excelentes. Esses resultados sugerem que, quando os furos estão suficientemente afastados das bordas internas, o aumento do espaçamento entre eles contribui de maneira positiva para a deformabilidade proporcional do conector. Isso é consistente com os achados da Figura 4.27, onde o aumento de S_b também resultava em maior W_{rel} , reforçando a ideia de que geometrias menos restritivas favorecem a dissipação gradual de energia.

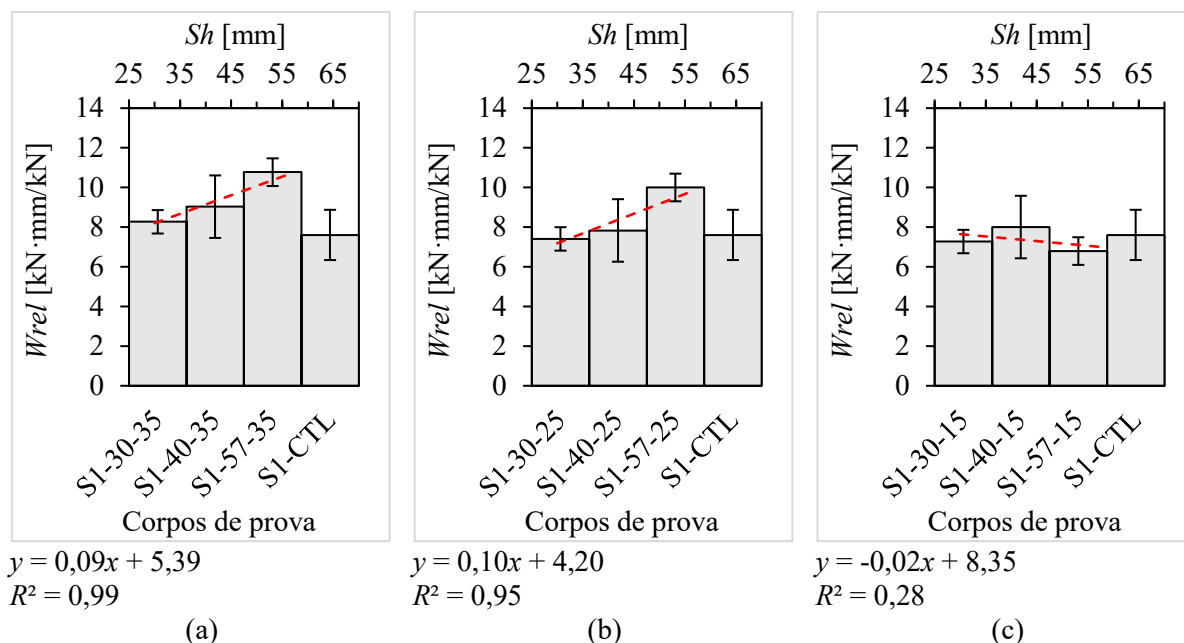


Figura 4.29 – Variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

Ao comparar os resultados de W_{rel} (Figura 4.29) com os de W_{abs} (Figura 4.28), verifica-se que ambos seguem padrões semelhantes nas configurações com S_b mais elevadas: crescimento de energia com o aumento de S_h e forte correlação estatística. No entanto, a energia relativa reforça essas conclusões com coeficientes de determinação ainda mais altos, o que corrobora o papel de W_{rel} como parâmetro mais estável e confiável para análises comparativas. Em síntese, os gráficos indicam que a combinação de maiores valores de S_h e S_b tende a favorecer conectores com maior capacidade de deformação proporcional, refletindo maior ductilidade relativa e comportamento mais estável ao longo do carregamento.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados de energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}) para os conectores da Série 1, organizados com base no espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). São fornecidos os valores individuais dos ensaios (x_n), as médias ($\bar{x}$), os desvios-padrão (s_d) e os coeficientes de variação (c_v), seguindo o mesmo formato adotado nas tabelas anteriores. Embora o volume de informações torne o conteúdo mais extenso, a exposição detalhada dos dados contribui para a transparência e a rastreabilidade do processo analítico.

Tabela 4.11 – Energia absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida ($S_{lo,u}$) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN·mm]	$\bar{x}$ [kN·mm]	s [kN·mm]	c_v [%]	x_n [kN·mm/kN]	$\bar{x}$ [kN·mm/kN]	s [kN·mm/kN]	c_v [%]
S1-57-35-A	558,64				11,43			
S1-57-35-B	490,69				10,94			
S1-57-35-C	529,51				12,55			
S1-57-25-A	555,21	463,56	94,48	20,38	10,60	10,18	1,73	16,95
S1-57-25-2	491,89				9,93			
S1-57-25-C	418,60				10,65			
S1-57-15-A	367,29				7,89			
S1-57-15-B	296,64				7,46			
S1-40-35-A	519,77				11,81			
S1-40-35-B	365,85				7,94			
S1-40-35-C	438,33				9,60			
S1-40-25-A	382,72	411,45	54,96	13,36	9,33	9,17	1,30	14,22
S1-40-15-A	359,40				8,20			
S1-40-15-B	404,60				8,63			
S1-40-15-C	409,46				8,66			
S1-30-35-A	424,44				10,90			
S1-30-35-B	383,61				10,03			
S1-30-25-A	349,28				8,85			
S1-30-25-B	344,35	372,05	29,29	7,87	8,34	9,04	1,17	12,96
S1-30-25-C	391,90				9,52			
S1-30-15-A	351,26				7,75			
S1-30-15-B	359,52				7,88			
S1-CTL-A	300,86				10,95			
S1-CTL-B	398,55	371,67	61,91	16,66	12,54	11,61	0,83	7,17
S1-CTL-C	415,59				11,33			

Entre os grupos analisados, os conectores com $S_h = 57$ mm apresentaram a maior média de energia absoluta absorvida, com $W_{abs} = 463,56$ kN·mm e $c_v = 20,38\%$, indicando desempenho elevado, ainda que com dispersão mais expressiva em comparação com outros grupos. Em seguida, os conectores com $S_h = 40$ mm registraram média de $W_{abs} = 411,45$ kN·mm, com menor coeficiente de variação (13,36%), o que sugere uma resposta mais estável entre réplicas. Já os conectores com $S_h = 30$ mm apresentaram média de $W_{abs} = 372,05$ kN·mm, com dispersão ainda mais controlada ($c_v = 7,87\%$), indicando consistência estatística, embora com menor capacidade de dissipação de energia.

O mesmo padrão de comportamento foi observado para os valores de energia relativa absorvida (W_{rel}). Os conectores com $S_h = 57$ mm obtiveram a maior média ($W_{rel} = 10,18$ kN·mm/kN), seguidos por $S_h = 40$ mm ($W_{rel} = 9,17$ kN·mm/kN) e $S_h = 30$ mm ($W_{rel} = 9,04$ kN·mm/kN). Os coeficientes de variação variaram entre 12,96% e 16,95%, reforçando que, mesmo com pequenas oscilações, os resultados permaneceram estatisticamente consistentes.

O grupo controle (S1- C_{TL}) apresentou valor médio de $W_{abs} = 371,67$ kN·mm, inferior aos registrados para os conectores com $S_h = 57$ mm e 40 mm. No entanto, o valor médio de $W_{rel} = 11,61$ kN·mm/kN foi o mais elevado entre todas as configurações analisadas. Esse resultado não se deve à elevada energia total acumulada, mas sim ao fato de que esses conectores atingiram cargas máximas menores e mantiveram um comportamento pós-pico estável e praticamente linear, o que favoreceu uma maior razão entre energia dissipada e carga máxima. Essa característica evidencia que, apesar da menor resistência, o grupo controle apresentou elevada capacidade de deformação após o pico de carga, o que se refletiu diretamente na energia relativa absorvida.

A análise da Tabela 4.11 reforça as conclusões observadas em figuras anteriores: conectores com maior espaçamento entre furos (S_h) tendem a apresentar melhores desempenhos em termos de dissipação de energia, tanto absoluta quanto relativa, especialmente quando a dispersão dos dados é considerada aceitável para ensaios experimentais. Ainda assim, é possível notar que esse comportamento está condicionado à interação com outras variáveis geométricas, como S_b , o que será explorado de forma integrada nas análises subsequentes.

A Figura 4.30 apresenta a variação da energia absoluta absorvida (W_{abs}) e da energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre furos e borda (S_b). Os dados médios utilizados nos gráficos foram obtidos a partir da Tabela 4.11, que reúne os resultados experimentais

organizados por S_h e permite avaliar com maior clareza os efeitos dessa variável geométrica na dissipação de energia.

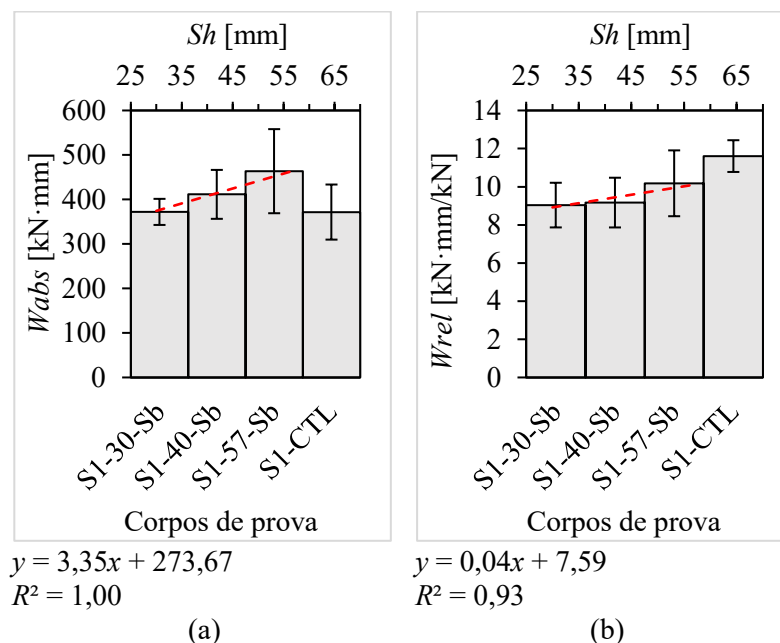


Figura 4.30 – Variação da (a) energia absorvida (W_{abs}) e da (b) energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1, em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Na Figura 4.30a, observa-se uma tendência linear crescente entre o espaçamento entre furos e a energia absoluta absorvida, representada pela equação $y = 3,35x + 273,67$. O coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 1,00$, o que indica que os dados se ajustam perfeitamente ao modelo linear. Isso confirma os padrões observados na Tabela 4.11, na qual os valores médios de W_{abs} aumentaram de $372,05 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ($S_h = 30 \text{ mm}$) para $411,45 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ($S_h = 40 \text{ mm}$) e $463,56 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ ($S_h = 57 \text{ mm}$). A influência de S_h sobre o desempenho energético é evidente, com maior espaçamento entre furos resultando em maior capacidade de absorver energia durante o carregamento.

Na Figura 4.30b, também é verificada uma relação linear crescente entre S_h e a energia relativa absorvida (W_{rel}), descrita pela equação $y = 0,04x + 7,59$, com $R^2 = 0,93$. Embora o crescimento de W_{rel} com o aumento de S_h seja mais suave que em W_{abs} , o ajuste do modelo ainda é considerado muito bom. A Tabela 4.11 mostra essa evolução com clareza: W_{rel} cresce de $9,04 \text{ kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$ ($S_h = 30 \text{ mm}$) para $9,17 \text{ kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$ ($S_h = 40 \text{ mm}$) e $10,18 \text{ kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$ ($S_h = 57 \text{ mm}$), indicando que o espaçamento entre furos contribui não apenas para o aumento da energia acumulada, mas também para a melhora da capacidade de deformação proporcional dos conectores.

Esses resultados confirmam que o espaçamento entre furos (S_h) exerce influência direta e contínua tanto sobre a energia total acumulada quanto sobre a capacidade de deformação proporcional dos conectores. Ao agrupar os dados independentemente da distância dos furos à borda (S_b), foi possível evidenciar uma relação clara e consistente entre S_h e os parâmetros de absorção de energia. Isso é reforçado pela excelente qualidade dos ajustes obtidos, especialmente para a energia absoluta ($R^2 = 1,00$) e também para a energia relativa ($R^2 = 0,93$), o que demonstra que as tendências identificadas se mantêm mesmo diante da variabilidade inerente aos ensaios experimentais.

Dando continuidade à avaliação do desempenho mecânico dos conectores da Série 1, a Tabela 4.12 apresenta os resultados de energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}), agora organizados por distância entre os furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre os furos (S_h). Essa abordagem permite isolar os efeitos de S_b sobre os parâmetros, complementando a leitura já realizada com base na variável S_h .

Os resultados médios de W_{abs} indicam que o afastamento dos furos em relação à borda contribui positivamente para a dissipação de energia. As médias aumentaram de 364,02 kN·mm ($S_b = 15$ mm) para 419,14 kN·mm ($S_b = 25$ mm), atingindo 463,86 kN·mm no caso de $S_b = 35$ mm. Esses dados confirmam que maiores valores de S_b favorecem trajetórias de fissuração mais longas e maior envolvimento do concreto ao redor do conector, ampliando a capacidade de absorção de energia. Os coeficientes de variação associados a W_{abs} variaram entre 10,32% ($S_b = 15$ mm) e 18,57% ($S_b = 25$ mm), sendo compatíveis com a variabilidade natural de ensaios experimentais dessa natureza.

Em relação à energia relativa (W_{rel}), observa-se padrão semelhante. Os valores médios foram de 7,45 kN·mm/kN ($S_b = 15$ mm), 8,58 kN·mm/kN ($S_b = 25$ mm) e 9,49 kN·mm/kN ($S_b = 35$ mm), mostrando que a deformabilidade proporcional dos conectores também se beneficia de furos afastados da borda interna. Além disso, os coeficientes de variação para W_{rel} se mantiveram em níveis controlados, inferiores a 20%, o que reforça a confiabilidade das médias obtidas.

Assim como verificado na Tabela 4.11, onde a variável S_h foi isolada, a Tabela 4.12 evidencia que o parâmetro S_b também exerce papel relevante sobre o comportamento mecânico dos conectores sob ação de cisalhamento. Os efeitos dessa variável sobre os parâmetros de energia serão explorados graficamente nas Figura 4.31a e Figura 4.31b a seguir, proporcionando uma visualização direta das tendências observadas.

Tabela 4.12 – Energia absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida ($S_{lo,u}$) dos conectores da Série 1: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), por espaçamento entre furos e borda (S_h), independentemente do espaçamento entre furos (S_b).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN·mm]	$\bar{x}$ [kN·mm]	s [kN·mm]	c_v [%]	x_n [kN·mm/kN]	$\bar{x}$ [kN·mm/kN]	s [kN·mm/kN]	c_v [%]
S1-57-35-A	558,64				11,43			
S1-57-35-B	490,69				10,04			
S1-57-35-C	529,51				10,84			
S1-40-35-A	519,77	463,86	71,10	15,33	10,64	9,49	1,46	15,33
S1-40-35-B	365,85				7,49			
S1-40-35-C	438,33				8,97			
S1-30-35-A	424,44				8,69			
S1-30-35-B	383,61				7,85			
S1-57-25-A	555,21				11,36			
S1-57-25-2	491,89				10,07			
S1-57-25-C	418,60				8,57			
S1-40-25-A	382,72	419,14	77,84	18,57	7,83	8,58	1,59	18,57
S1-30-25-A	349,28				7,15			
S1-30-25-B	344,35				7,05			
S1-30-25-C	391,90				8,02			
S1-57-15-A	367,29				7,52			
S1-57-15-B	296,64				6,07			
S1-40-15-A	359,40				7,36			
S1-40-15-B	404,60	364,02	37,56	10,32	8,28	7,45	0,77	10,32
S1-40-15-C	409,46				8,38			
S1-30-15-A	351,26				7,19			
S1-30-15-B	359,52				7,36			
S1-CTL-A	300,86				6,16			
S1-CTL-B	398,55	371,67	61,91	16,66	8,16	7,61	1,27	16,66
S1-CTL-C	415,59				8,51			

A Figura 4.31 apresenta a variação da energia absoluta absorvida (W_{abs}) e da energia relativa absorvida (W_{rel}) em função da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h). Os dados plotados foram extraídos da Tabela 4.12, que consolidou os resultados individuais por S_b e evidenciou um padrão crescente tanto para W_{abs} quanto para W_{rel} à medida que os furos se afastam das bordas internas dos conectores.

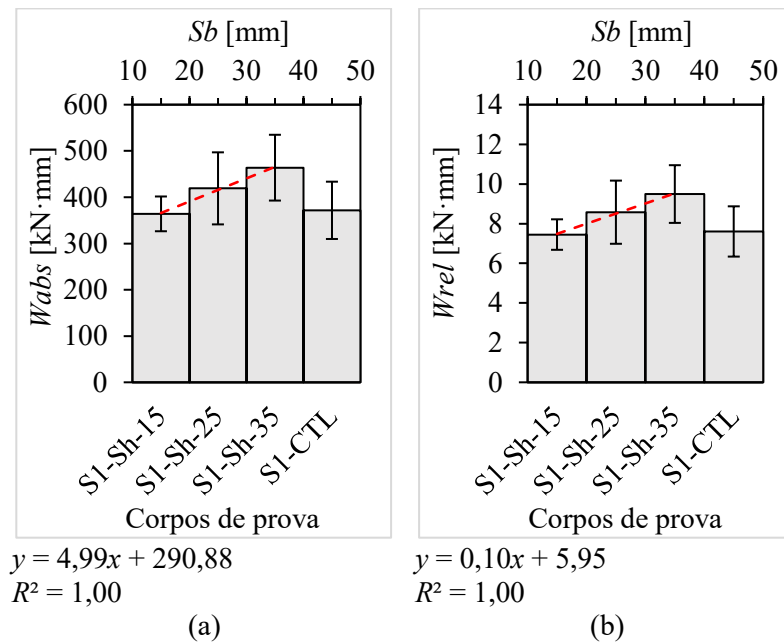


Figura 4.31 – Variação da (a) energia absorvida (W_{abs}) e da (b) energia relativa absorvida (W_{rel}) nos conectores da Série 1, em função do espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Na Figura 4.31a, observa-se uma tendência linear crescente entre S_b e a energia absoluta absorvida (W_{abs}), representada pela equação $y = 4,99x + 290,88$, com coeficiente de determinação $R^2 = 1,00$, indicando um ajuste excelente do modelo aos dados experimentais. Esse comportamento confirma os resultados da Tabela 4.12, na qual os valores médios de W_{abs} aumentam de 364,02 kN·mm ($S_b = 15$ mm) para 463,86 kN·mm ($S_b = 35$ mm), evidenciando que maiores distâncias entre os furos e a borda interna favorecem maior acúmulo de energia durante o carregamento.

Esse efeito pode estar associado ao comportamento das fissuras dos conectores. Conforme mostrado na Tabela 4.6 correspondente à Figura 4.11, a extensão média das fissuras também apresentou crescimento com o aumento de S_b , passando de aproximadamente 28,5 cm para 33,8 cm. Isso sugere que furos mais afastados das bordas internas permitem trajetórias de fissuração mais longas, o que pode contribuir para o aumento da energia dissipada nos ensaios.

A Figura 4.31b, por sua vez, mostra comportamento semelhante para a energia relativa absorvida, com equação $y = 0,10x + 5,95$ e, também, com $R^2 = 1,00$, reafirmando a correlação direta entre S_b e W_{rel} . Os valores médios de W_{rel} passaram de 7,45 kN·mm/kN ($S_b = 15$ mm) para 9,49 kN·mm/kN ($S_b = 35$ mm), evidenciando que a deformabilidade proporcional dos conectores também é favorecida por geometrias com maior afastamento dos furos em relação às bordas.

A comparação com a Figura 4.30 é bastante elucidativa. Enquanto naquela se verificou a influência positiva do espaçamento entre furos (S_h), nesta se observa que a distância dos furos às bordas internas (S_b) tem efeito tão relevante quanto. Ambas as variáveis geométricas apresentaram tendência linear clara e excelente qualidade de ajuste ($R^2 = 1,00$ em todos os casos), o que demonstra que S_h e S_b atuam de forma complementar na melhoria do desempenho mecânico dos conectores quanto à dissipação de energia.

Assim, a Figura 4.31 conclui a análise dos efeitos individuais de S_b sobre os parâmetros energéticos, confirmando os padrões observados estatisticamente na Tabela 4.12 e fornecendo suporte gráfico para a interpretação comparativa dos efeitos geométricos ao longo do comportamento dos conectores.

4.2.3.3 Avaliação da ductilidade

Os parâmetros obtidos a partir da modelagem estão detalhados na Tabela 4.13, destacando-se que o conector sem furos apresentou a maior rigidez inicial ($K_f = 55,7$ kN/mm).

Tabela 4.13 – Parâmetros resultantes da modelagem das curvas, classificados de acordo com a ductilidade dos conectores da Série 1.

Identificação	P_e [kN]	P_{Rk} [kN]	δ_{ek} [mm]	δ_{uk} [mm]	K_f [kN/mm]	Categoria de ductilidade
S1-57-35	43,8	39,4	0,76	11,85	51,8	D3
S1-57-25	45,5	40,9	1,14	9,43	35,9	D2
S1-57-15	41,8	37,6	0,86	2,19	43,7	D1
S1-40-35	41,6	37,4	0,74	8,32	50,5	D2
S1-40-25	41,0	36,9	0,87	7,64	42,4	D2
S1-40-15	43,5	39,2	0,79	2,72	49,6	D1
S1-30-35	38,3	34,5	0,67	6,44	51,5	D2
S1-30-25	38,5	34,6	0,78	2,67	44,4	D1
S1-30-15	45,3	40,4	0,79	2,34	51,1	D1
S1-CTL	30,4	27,3	0,49	12,76	55,7	D3

A Figura 4.32a, Figura 4.32b e Figura 4.32c mostram a modelagem dos conectores com furos, classificados em categorias de ductilidade como dúcteis (D3 ou D2) ou frágeis (D1). A Figura 4.32d ilustra o comportamento do conector sem furos, também classificado como dúctil. Observa-se que a presença e o posicionamento dos furos afetam diretamente a ductilidade dos conectores, podendo reduzi-la quando os furos estão próximos à borda interna (ex.: S1-57-15, S1-40-15 e S1-30-15). Por outro lado, conectores com furos bem espaçados e afastados da borda interna (ex.: S1-57-35) exibem um comportamento dúctil, com capacidade de deformação igual ou superior a 10 mm (D3).

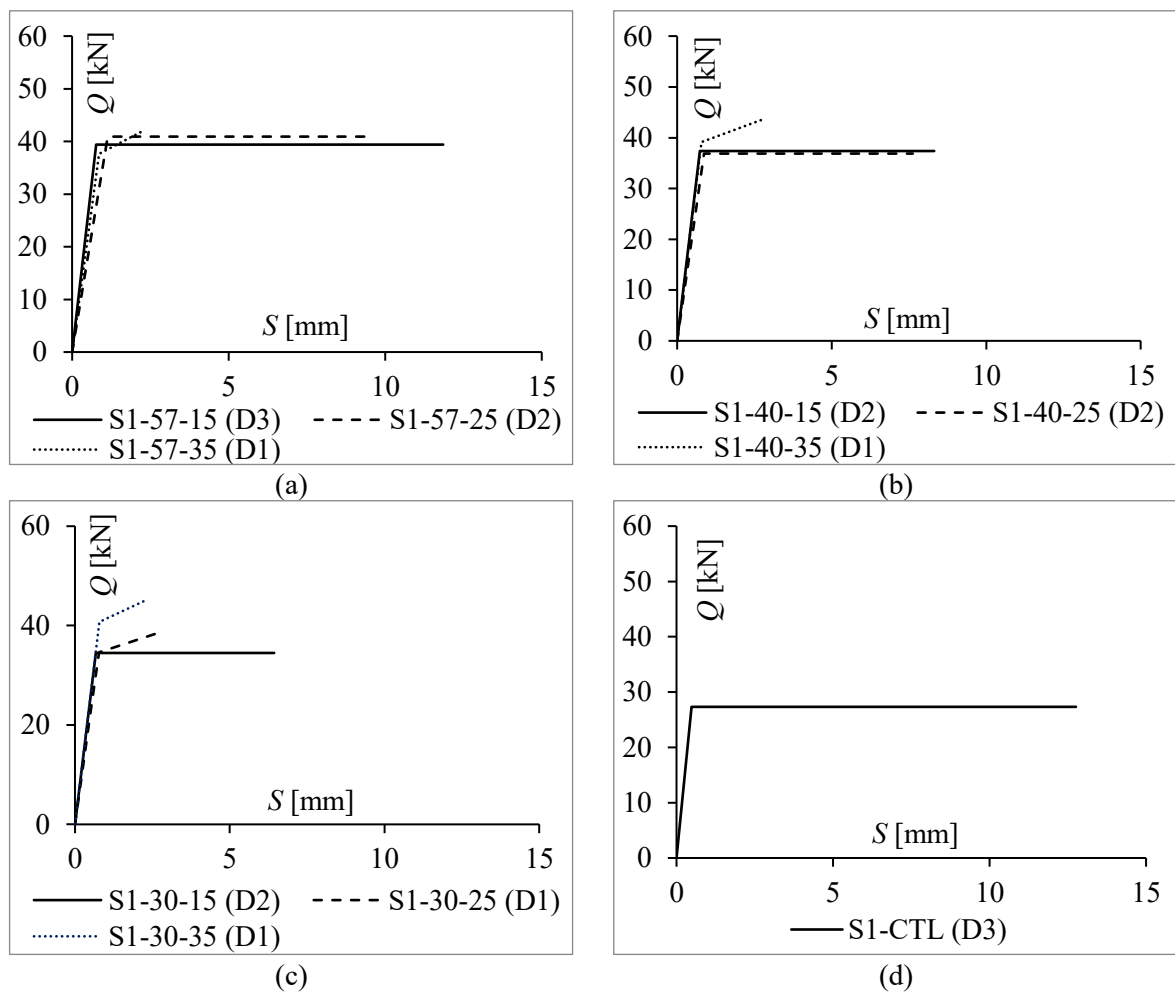


Figura 4.32 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 1: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; (c) S1-30- S_b ; e (d) S1-CTL.

4.2.3.4 Análise estatística

Inicialmente, os diagramas foram construídos com base na média dos resultados para diferentes distâncias entre furos, independentemente da distância entre furos e a borda (Figura 4.33a, Figura 4.33c e Figura 4.33e). Posteriormente, foram gerados gráficos que consideram a média dos resultados para diferentes distâncias entre furos e borda,

independentemente da distância entre furos (Figura 4.33b, Figura 4.33d e Figura 4.33f). Essa abordagem permitiu uma análise detalhada da influência de ambos os parâmetros, separadamente, na capacidade última, na energia absorvida e na extensão das fissuras. O conector S1- C_{TL} , correspondente ao modelo sem furos, foi excluído dessa análise devido ao número limitado de réplicas (três), insuficiente para análises estatísticas robustas.

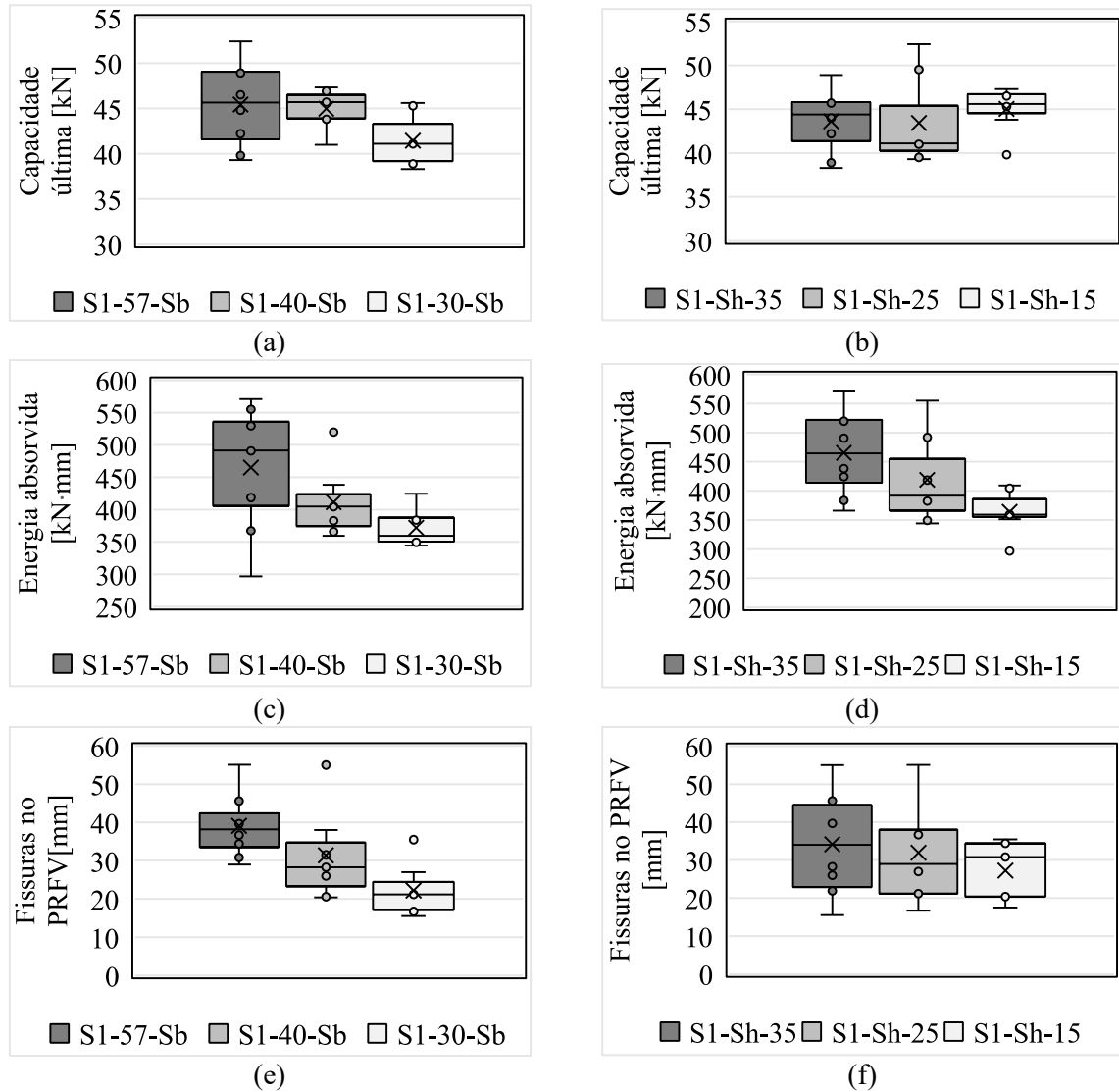


Figura 4.33 – Resultados de capacidade última em função da distância (a) entre furos e (b) entre furo e borda; energia absorvida em função da distância (c) entre furos e (d) entre furo e borda; e ductilidade em função da distância (e) entre furos e (f) entre furo e borda.

Conforme apresentado na Tabela 4.14. Apenas os resultados de energia absorvida (Figura 4.33c e Figura 4.33d) e de extensão das fissuras (Figura 4.33e) mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as médias.

Tabela 4.14 – Resultados da ANOVA referentes à capacidade última, energia absorvida e extensão das fissuras dos conectores da Série 1.

Parâmetro	ID	Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F_0	$F_{5\%}$	Teste ¹
$Q_{lo,u}$ [kN]	S1-57- S_b	Entre trat.	69,13	2	34,57			
	S1-40- S_b	Residual	239,88	19	12,63	2,74	3,52	H0
	S1-30- S_b	Total	309,02	21	—			
	S1- S_h -35	Entre trat.	10,78	2	5,39			
	S1- S_h -25	Residual	298,24	19	15,70	0,34	3,52	H0
	S1- S_h -15	Total	309,02	21				
W_{abs} [kN·mm]	S1-57- S_b	Entre trat.	32.799	2	16.400			
	S1-40- S_b	Residual	88.191	19	4.642	3,53	3,52	H1
	S1-30- S_b	Total	120.990	21	—			
	S1- S_h -35	Entre trat.	38.351	2	19.175			
	S1- S_h -25	Residual	82.639	19	4.349	4,41	3,52	H1
	S1- S_h -15	Total	120.990	21	—			
l_f [cm]	S1-57- S_b	Entre trat.	1.065	2	533			
	S1-40- S_b	Residual	1.677	19	88	6,03	3,52	H1
	S1-30- S_b	Total	2.743	21	—			
	S1- S_h -35	Entre trat.	184	2	92			
	S1- S_h -25	Residual	2.559	19	135	0,68	3,52	H0
	S1- S_h -15	Total	2.743	21	—			
Obs. 1: se $F_0 > F_{5\%}$, então H1 (hipótese alternativa); caso contrário, então H0 (hipótese nula).								

Os resultados do Teste de Duncan estão detalhados na Tabela 4.15. No que se refere à energia absorvida, as comparações “S1- S_h -35 vs. S1- S_h -15” e “S1-57- S_b vs. S1-30- S_b ” mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as médias. Já para a extensão das fissuras, a comparação “S1-57- S_b vs. S1-30- S_b ” também revelou diferença significativa.

Tabela 4.15 – Teste de Duncan para energia absorvida e extensão das fissuras.

Parâmetro	$S_{\bar{x}_i}$	Comparação		Médias		Diferença entre as médias		V_α	R_p	Teste ¹	
W_{abs} [kN·mm]	24,40	S1- S_h -35	vs. C- S_h -15	465,38	vs. 364,03	101,35	3,11	R_3	75,89	H1	
		S1- S_h -35	vs. C- S_h -25	465,38	vs. 419,14	46,23	2,96	R_2	72,23	H0	
		S1- S_h -25	vs. C- S_h -15	419,14	vs. 364,03	55,11	2,96	R_2	72,23	H0	
	25,21	S1-57- S_b	vs. C-30- S_b	465,08	vs. 372,06	93,02	3,11	R_3	78,40	H1	
		S1-57- S_b	vs. C-40- S_b	465,08	vs. 411,46	53,62	2,96	R_2	74,62	H0	
		S1-40- S_b	vs. C-30- S_b	411,46	vs. 372,06	39,40	2,96	R_2	74,62	H0	
l_f [mm]	3,48	S1-57- S_b	vs. C-30- S_b	39,08	vs. 22,19	16,89	3,11	R_3	10,81	H1	
		S1-57- S_b	vs. C-40- S_b	39,08	vs. 31,40	7,67	2,96	R_2	10,29	H0	
		S1-40- S_b	vs. C-30- S_b	31,40	vs. 22,19	9,21	2,96	R_2	10,29	H0	
Obs. 1: se $(\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}) > R_p$, então H1 (hipótese alternativa); caso contrário, então H0 (hipótese nula).											

Os resultados obtidos nos itens anteriores esclareceram diversos aspectos do comportamento dos conectores PERFOFRP. Entre os principais achados, destaca-se que a adição de perfurações aumentou, em média, em 37,5% a capacidade última dos conectores, sem impactar, contudo, sua capacidade média de absorver energia. Essas perfurações, entretanto, influenciaram sua ductilidade, induzindo, inclusive, um comportamento frágil quando posicionadas muito próximas da borda interna do conector.

Ao restringir a análise exclusivamente aos conectores perfurados (excluindo, portanto, o grupo controle, que não possui furos), observa-se que a capacidade última dos conectores não é afetada pela variação na distância entre os furos e entre o furo e a borda, como indicado pelos resultados da ANOVA (hipótese nula). Por outro lado, a energia absorvida é influenciada pela variação nessas distâncias, conforme demonstrado pela ANOVA (hipótese alternativa), sendo que a distância entre o furo e a borda exerce maior impacto na capacidade de absorção de energia ($F_0 = 4,41 > F_{5\%} = 3,52$) do que a distância entre os furos ($F_0 = 3,53 > F_{5\%} = 3,52$). Ademais, o aumento na energia absorvida, em ambos os casos, torna-se significativo apenas com uma variação mínima de 15 mm para 35 mm na distância entre furo e borda e de 30 mm para 57 mm na distância entre furos, conforme evidenciado pelos resultados do Teste de Duncan ($101,35 > R_3 = 75,89$ e $93,02 > R_3 = 72,23$).

Para mais, conforme resultados da modelagem, a ductilidade foi influenciada pela combinação entre a distância entre furos e pela distância entre furo e borda (Quadro 4.1), sendo que a distância entre furo e borda exerceu uma maior influência. Afinal, todas as curvas com conectores cujos furos distam 35 mm da borda, apresentaram comportamento dúctil (D3 ou D2) e todas as curvas com conectores cujos furos distam 15 mm da borda apresentaram comportamento frágil (D1).

Novamente, o aumento na ductilidade só é determinante, se os furos são aproximados em direção à borda de 15 mm para 35 mm, pelo menos. Além disso, embora em menor magnitude, a distância entre furos também exerce alguma influência na ductilidade, pois somente com a distância entre furos de 57 mm, combinada com o espaçamento entre furo e borda de 35 mm, que a classificação D3 foi alcançada.

Quadro 4.1 – Influência da distância entre furos (S_h) e da distância entre furo e borda (S_b) na ductilidade D_n e na absorção de energia (W_{abs}) dos conectores.

$S_b \backslash S_h$	57 mm	40 mm	30 mm
15 mm	D3 (530)	D2 (441)	D2 (404)
25 mm	D2 (489)	D2 (383)	D1 (361)
35 mm	D1 (332)	D1 (391)	D1 (355)

A energia absorvida pelos conectores pode ser correlacionada com a ductilidade, dado que aqueles que absorveram mais energia também demonstraram comportamento mais dúctil. Conectores classificados como D3, D2 e D1 registraram, aproximadamente, absorções de energia de 500, 400 e 300 kN·mm, respectivamente, conforme apresentado no Quadro 4.1.

A extensão das fissuras foi influenciada exclusivamente pela variação na distância entre furos, conforme indicado pelos resultados da ANOVA (hipótese alternativa). Essa diferença é observada apenas quando os furos são afastados entre si de, no mínimo, 30 mm para 57 mm, segundo o teste de Duncan ($16,89 > R_3 = 10,81$). Por fim, destaca-se que apenas ajustando geometria do conector, é possível melhorar suas propriedades de ductilidade e de absorção de energia, mantendo sua resistência inalterada.

Diante da limitação imposta pelo número reduzido de réplicas em alguns grupos da Série 1, decorrente de problemas de concretagem que resultaram em corpos de prova defeituosos e consequentemente descartados, recomenda-se a realização de novos ensaios experimentais ou o desenvolvimento de estudos numéricos. Essas abordagens complementares podem fornecer maior robustez estatística às análises e permitir a validação independente dos padrões de comportamento observados.

4.3 Série 2: avaliação do efeito dos mecanismos resistentes no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

Este capítulo apresenta os resultados da Série 2, dedicada à investigação do comportamento mecânico de conectores submetidos à ação de cisalhamento duplo. Os ensaios foram conduzidos com o objetivo de isolar os principais mecanismos resistentes atuantes, por meio da modificação proposital de condições geométricas e de aderência. Foram analisadas seis configurações experimentais: conectores de GFRP com e sem aderência ao concreto, conectores com reforço nos furos, conectores com ambas as modificações combinadas, uma configuração metálica e um grupo controle.

Neste caso, o grupo controle corresponde ao conector de GFRP sem nenhuma modificação adicional, mas com a presença de furos, diferentemente da Série 1, cujo grupo

controle era composto por conectores maciços, sem furos. Outra diferença importante em relação à Série 1 diz respeito à espessura das placas dos conectores. Enquanto na Série 1 foi adotada uma espessura de aproximadamente 4 mm, na Série 2 utilizaram-se placas com espessura reduzida, de cerca de 2 mm, mesma espessura adotada posteriormente nas Séries 3 e 4.

Os resultados obtidos na Série 2 foram considerados na formulação do modelo analítico dos tópicos 5.1 (ruptura nos pinos de concreto) e 5.2.3 (ruptura por perda de aderência). Para isolar esse mecanismo, no caso do tópico 5.2.3, utilizaram-se ensaios com conectores sem perfurações nas duas espessuras avaliadas (3,87 mm e 2,00 mm); as médias de ruptura de 31,98 kN e 26,14 kN, respectivamente, permitiram estimar uma tensão média de aderência de 1,45 MPa, assumindo o GFRP como dupla superfície de ancoragem e área de contato de 20.000 mm². A partir desses dados, foi proposta a expressão para estimativa da força última mobilizada por aderência (Q_{adh}) em conectores com configuração semelhante.

Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo devem ser interpretados dentro do intervalo de validade definido pelas condições experimentais adotadas na Série 2. A análise restringe-se às combinações específicas de material, espessura de laminado e modificações geométricas e de aderência investigadas, não sendo recomendada a extrapolação direta para conectores com características distintas daquelas consideradas nos ensaios.

4.3.1 Padrões de fissuração

A Figura 4.34 ilustra os padrões de fissuração observados nos conectores da Série 2. Os códigos identificam as variações construtivas dos conectores: S2-FRP refere-se ao grupo de controle da Série 2, com GFRP perfurado sem modificações adicionais; S2-FRP-EA inclui aplicação de teflon para eliminação da aderência; S2-FRP-RH possui barras de aço passando pelos furos (reforço horizontal); e S2-FRP-EA/RH combina ambos os artifícios, eliminação da aderência e reforço nos furos.

Diferentemente da Série 1, em que as fissuras se concentraram predominantemente no lado direito dos conectores, na Série 2 observou-se ocorrência de fissuras em ambos os lados (direito e esquerdo). Essa diferença pode estar associada à menor espessura dos conectores da Série 2 (cerca de 2 mm), em comparação aos da Série 1 (4 mm), o que implica menor inércia da seção e, conseqüentemente, maior suscetibilidade a fissuras distribuídas.

De modo geral, observou-se a predominância de fissuras na região de GFRP confinado, enquanto a aplicação de enrijecedores de aço na região de GFRP na região entre camadas de concreto mostrou-se eficaz em evitar a ocorrência de fissuras nessa área. Na Figura

4.34a, na Figura 4.34b e na Figura 4.34c (conectores do grupo de controle), as fissuras são tipicamente inclinadas a 45°, partindo dos furos em direção às bordas verticais interna e externa dos conectores, refletindo o comportamento clássico de cisalhamento.

Na Figura 4.34d, na Figura 4.34e e na Figura 4.34f (conectores com eliminação de aderência), ainda que persistam fissuras inclinadas, observou-se predominância de fissuras verticais cortando o lado direito dos conectores, muitas delas atravessando os furos. A maior fissuração, em comparação aos conectores sem teflon, pode ser atribuída à ausência de aderência entre conector e concreto, concentrando as tensões exclusivamente no GFRP.

Já na Figura 4.34g, na Figura 4.34h e na Figura 4.34i (conectores com barras de aço nos furos), as fissuras predominantes são verticais e concentradas na região da borda interna dos conectores. Como o concreto foi retirado dos furos para passagem das barras, não houve fissuração nessa região. Isso pode ter promovido maior rigidez local, deslocando o ponto crítico de tensão para a interface entre o GFRP e o concreto, favorecendo a abertura de fissuras nessa zona. Algumas fissuras inclinadas também foram observadas na região de GFRP na região entre camadas de concreto, mas são em menor número e provavelmente secundárias, desenvolvendo-se após o início da fissuração vertical.

Por fim, a Figura 4.34j, a Figura 4.34k e a Figura 4.34l, referentes aos conectores com eliminação da aderência e reforço nos furos, apresentaram fissuras verticais e/ou inclinadas distribuídas ao longo do GFRP confinado, refletindo um comportamento misto e indicando a eficiência do teflon em eliminar a aderência entre GFRP e concreto. Tal eficiência foi confirmada visualmente durante a demolição dos blocos, quando se constatou a completa ausência de ligação entre os materiais. A análise comparativa com os conectores do grupo de controle reforça esse diagnóstico. Ademais, diferentemente da Série 1, os conectores da Série 2 com aplicação de teflon não apresentavam ranhuras superficiais, o que reforça a distinção de comportamento mecânico entre as séries.

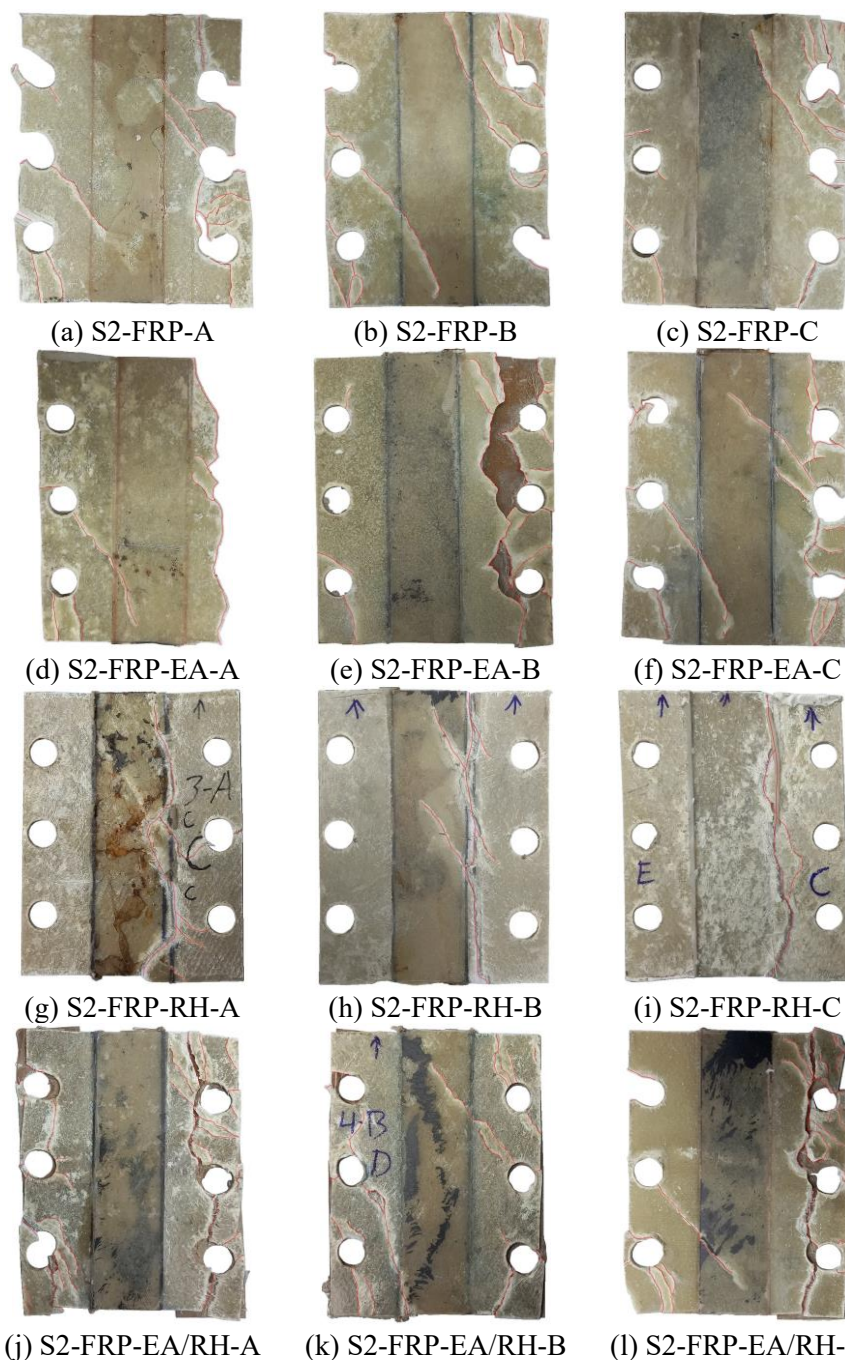


Figura 4.34 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 2: (a) S2-FRP-A; (b) S2-FRP-B; (c) S2-FRP-C; (d) S2-FRP-EA-A; (e) S2-FRP-EA-B; (f) S2-FRP-EA-C; (g) S2-FRP-RH-A; (h) S2-FRP-RH-B; (i) S2-FRP-RH-C; (j) S2-FRP-EA/RH-A; (k) S2-FRP-EA/RH-B; (l) S2-FRP-EA/RH-C.

A Tabela 4.16 apresenta os valores individuais e estatísticos da extensão das fissuras (l_f) observadas nos conectores da Série 2, por configuração. São apresentados os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação (c_v), permitindo uma comparação direta entre os diferentes tipos de conectores ensaiados.

Tabela 4.16 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 2: valores individuais (x_n), médias ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v), de acordo com a configuração de cada conector.

Código	x_n [cm]	$\bar{x}$ [cm]	s [cm]	c_v [%]
S2-FRP-A	55,83			
S2-FRP-B	68,21	56,42	11,50	20,39
S2-FRP-C	45,22			
S2-FRP-EA-A	43,74			
S2-FRP-EA-B	61,20	56,82	11,53	20,29
S2-FRP-EA-C	65,51			
S2-FRP-RH-A	35,22			
S2-FRP-RH-B	36,78	34,74	2,33	6,70
S2-FRP-RH-C	32,21			
S2-FRP-EA/RH-A	74,16			
S2-FRP-EA/RH-B	59,87	69,38	8,24	11,88
S2-FRP-EA/RH-C	74,12			

Como pode ser observado, a configuração S2-FRP-RH, que incorpora barras de aço atravessando os furos, resultou na menor extensão média de fissuras (34,74 cm), com baixa dispersão dos dados ($c_v = 6,70\%$). Esse resultado indica que as tensões internas foram concentradas na interface entre o conector e o concreto, inibindo o surgimento de múltiplas fissuras distribuídas ao longo do comprimento do conector.

Já a configuração S2-FRP-EA/RH, que combina a eliminação da aderência com o reforço nos furos, apresentou a maior extensão média de fissuras (69,38 cm), com desvio-padrão de 8,24 cm e c_v de 11,88%. A completa descontinuidade na interface entre o GFRP e o concreto fez com que o conector suportasse integralmente os esforços, favorecendo o surgimento de fissuras extensas e generalizadas.

As configurações S2-FRP (controle com furos) e S2-FRP-EA (com eliminação da aderência) exibiram extensões médias intermediárias (56,42 cm e 56,82 cm, respectivamente), com coeficientes de variação em torno de 20%. Ainda que a extensão total das fissuras tenha sido semelhante, os padrões visuais observados nos conectores foram diferentes, conforme discutido na análise das imagens da Figura 4.34.

A Figura 4.35 ilustra graficamente esses resultados, destacando as diferenças entre as configurações quanto à média e dispersão da extensão das fissuras. O gráfico reforça que os conectores com reforço nos furos limitaram o desenvolvimento de fissuras longitudinais, concentrando esforços em regiões críticas. Em contrapartida, os conectores com aderência eliminada apresentaram fissuras mais extensas, especialmente quando houve reforço nos furos, sugerindo um comportamento mais deformável.

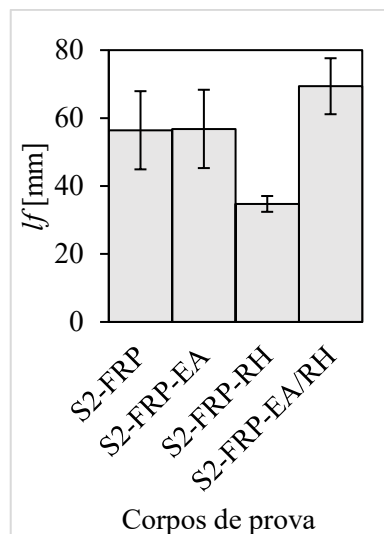


Figura 4.35 – Representação visual da extensão das fissuras nos conectores da Série 2: médias ($\bar{x}$) e barras de erros representadas pelos desvios-padrão (s), de acordo com a configuração de cada conector.

A Figura 4.36 apresenta os conectores metálicos da Série 2 (Figura 4.36a, Figura 4.36b e Figura 4.36c) e os conectores do grupo controle (Figura 4.36d, Figura 4.36e e Figura 4.36f), ambos após os ensaios de cisalhamento duplo. Em todos os casos, não foram identificadas fissuras nos conectores. Nos conectores metálicos (Figura 4.36a, b e c), observou-se apenas a deformação local do formato dos furos e, de forma mais sutil, uma deformação global do conector, perceptível principalmente nos vértices. Já nos conectores do grupo controle (Figura 4.36d, e e f), que não possuem furos, também não se observou fissuração no conector, havendo apenas marcas superficiais decorrentes do contato com o concreto.

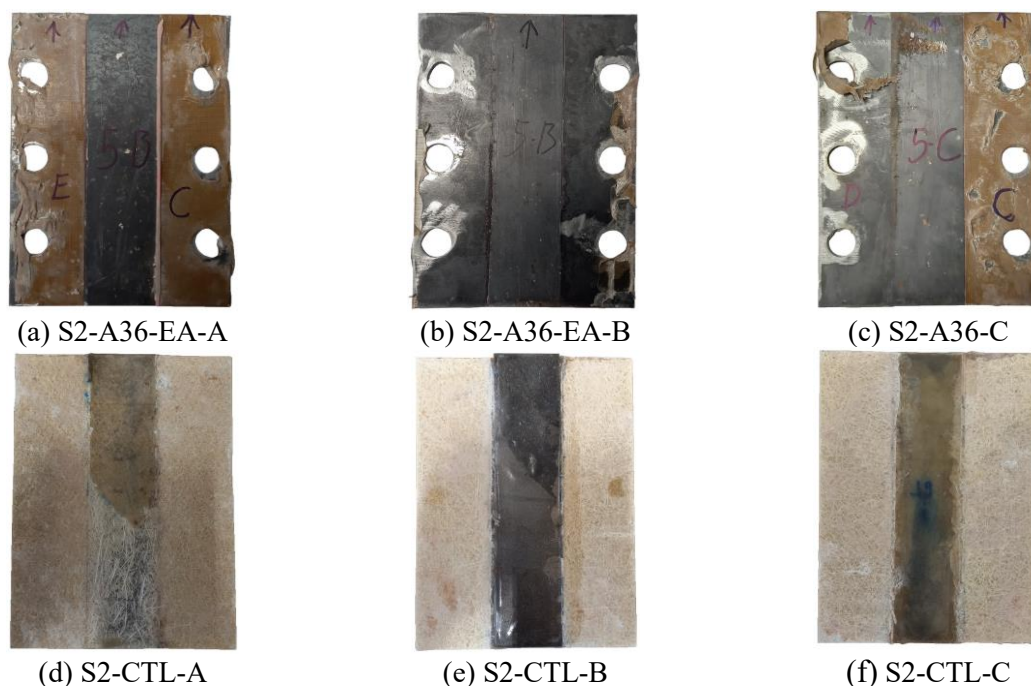


Figura 4.36 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 2: (a) S2-FRP-EA-A; (b) S2-FRP-EA-B; (c) S2-FRP-EA-C; (d) S2-CTL-A; (e) S2-CTL-B; e (f) S2-CTL-C.

4.3.2 Carregamento versus deslizamento relativo

A análise da relação entre a força aplicada e o deslizamento relativo nos conectores permite avaliar o desempenho mecânico de cada configuração ao longo dos regimes elástico e inelástico. Esses gráficos são fundamentais para a interpretação do comportamento global do conector, especialmente em termos de rigidez inicial, capacidade resistente e ductilidade. A seguir, são apresentadas as curvas obtidas nos ensaios experimentais da Série 2, organizadas por grupo de conectores. Cada conjunto de gráficos é analisado individualmente, destacando-se os padrões observados, os efeitos das modificações introduzidas e os aspectos diferenciais em relação às demais configurações testadas.

4.3.2.1 Gráficos individuais

A Figura 4.37 apresenta as curvas força versus deslizamento relativo obtidas para os conectores da Série 2, organizadas por configuração. Nota-se que as réplicas de uma mesma configuração exibiram respostas bastante semelhantes entre si, o que evidencia a consistência na execução dos ensaios e a confiabilidade na reprodutibilidade dos dados obtidos.

Quanto aos comportamentos observados, é possível classificá-los em três categorias, conforme a forma de colapso e a resposta pós-pico. O comportamento frágil foi observado nos conectores S2-FRP-RH, que apresentaram ruptura abrupta logo após o pico de força, sem manutenção significativa de resistência residual. Já os conectores S2-FRP e S2-CTL

apresentaram um comportamento intermediário, classificado como semi-dúctil. No caso do S2-FRP, a força caiu quase a zero ao final do deslocamento registrado, enquanto no S2-CTL a queda foi mais moderada, com a força estabilizando-se em torno da metade do valor máximo até o fim do ensaio.

Os conectores S2-FRP-EA, S2-FRP-EA/RH e S2-A36-EA demonstraram comportamento mais dúctil. Nesses casos, observou-se um patamar quase linear após o pico de força, indicando a capacidade de manter parte significativa da resistência durante o deslizamento. O conector S2-FRP-EA/RH, em particular, apresentou um pico mais deslocado ao longo do eixo horizontal, o que indica um atraso na ocorrência da força máxima, com boa manutenção da resistência na sequência. Tais resultados reforçam o papel das alterações introduzidas (como a eliminação da aderência, o reforço dos furos ou a mudança do material do conector) na modulação do comportamento estrutural dos sistemas analisados.

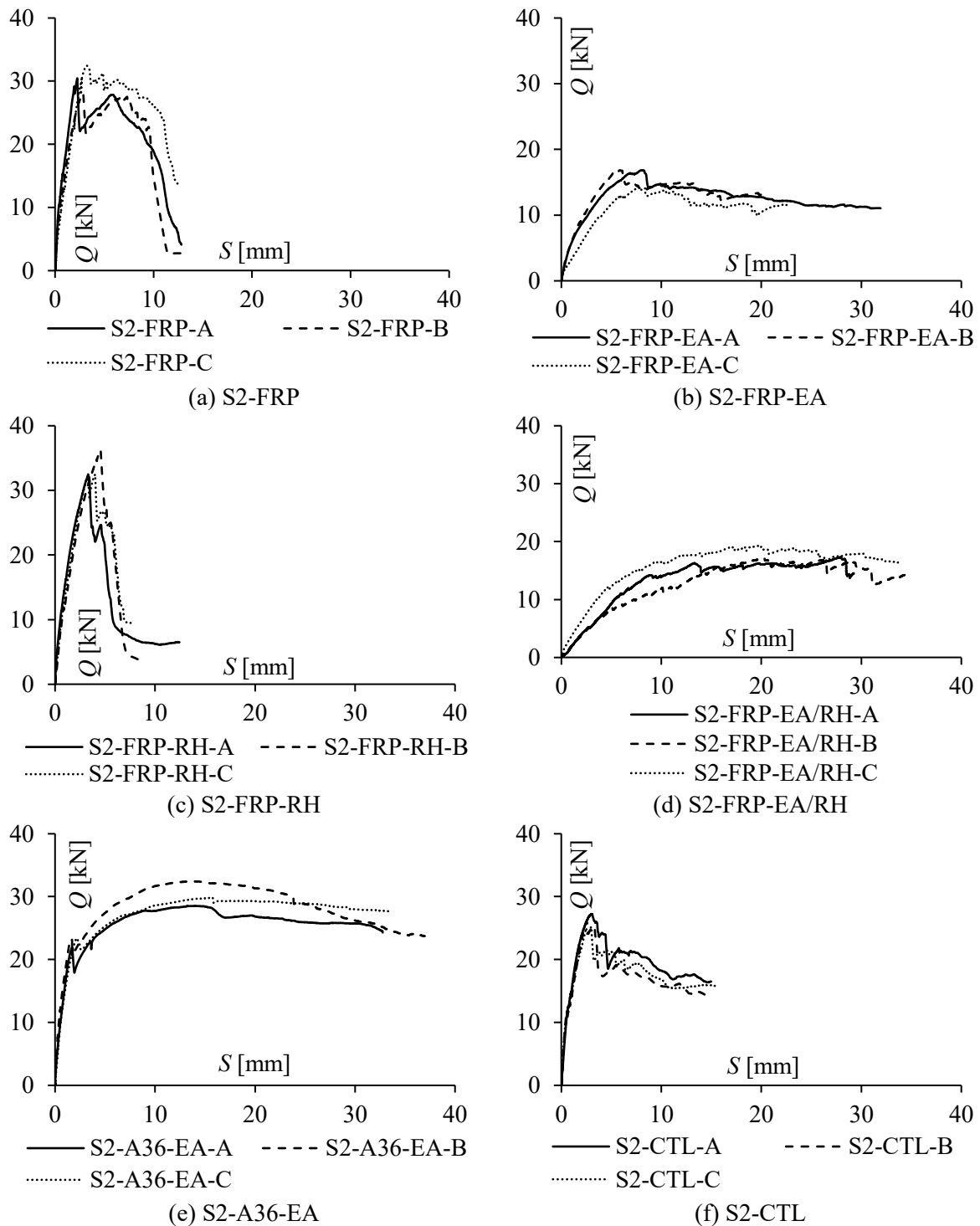


Figura 4.37 – Curvas força *versus* deslizamento relativo dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP-*r*; (b) S2-FRP-EA-*r*; (c) S2-FRP-RH-*r*; (d) S2-FRP-EA/RH-*r*; (e) S2-A36-EA-*r*; (f) S2-CTL-*r*.

4.3.2.2 Gráficos combinados

Com o objetivo de facilitar a comparação entre as diferentes configurações avaliadas na Série 2, as curvas médias das réplicas foram organizadas em gráficos combinados. Para evitar excesso de informações em uma única figura, o que dificultaria a interpretação, a apresentação foi dividida estrategicamente em dois conjuntos. A Figura 4.38a reúne o conector

de referência (S2-FRP) com os conectores que mantiveram a aderência entre o GFRP e o concreto. Já a Figura 4.38b inclui o mesmo conector de referência junto aos conectores em que a aderência foi eliminada. Essa separação foi feita com base no comportamento estrutural observado, que tende a ser mais frágil ou semi-dúctil quando a aderência é mantida e mais dúctil quando ela é suprimida.

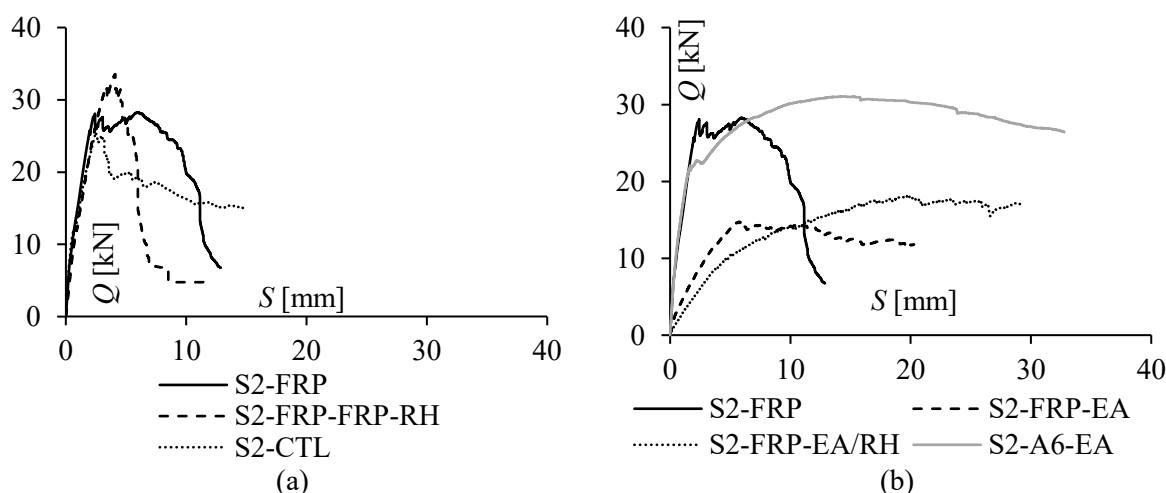


Figura 4.38 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 2: (a) conectores sem eliminação da aderência entre o conector e o concreto; (b) conectores com eliminação da aderência entre o conector e o concreto.

Na Figura 4.38a, observa-se que todos os conectores apresentaram trechos iniciais bastante semelhantes, o que é coerente com o fato de todos manterem aderência entre o GFRP e o concreto. Essa semelhança se estende até a proximidade do pico de força, com exceção do conector S2-FRP-RH, que atingiu um pico ligeiramente superior, comportamento possivelmente relacionado à resistência adicional proporcionada pelo reforço de aço inserido nos furos. No entanto, logo após o pico, o S2-FRP-RH sofreu uma queda abrupta de resistência, indicando um comportamento mais frágil que os demais, provavelmente em função da concentração de tensões na interface entre o GFRP e o concreto, intensificada pela ausência de concreto nos furos.

O conector S2-CTL, por sua vez, apresentou uma queda moderada após o pico, estabilizando-se em um platô relativamente constante até o final do ensaio. Esse comportamento está relacionado ao deslizamento do conector dentro do concreto, sem, no entanto, provocar fissuração no próprio conector. Já o S2-FRP manteve um patamar aproximadamente linear após o pico, com queda acentuada de resistência apenas no final do curso do LVDT, indicando uma capacidade limitada, porém efetiva, de redistribuição de tensões. Esse comportamento é coerente com o observado na Série 1, especialmente no conector

S1-57-35, que possui geometria semelhante, porém com espessura maior (cerca de 4 mm), justificando a força superior registrada no pico em comparação ao S2-FRP (espessura de aproximadamente 2 mm).

Na Figura 4.38b, observa-se uma comparação interessante entre conectores com características distintas. O S2-FRP, fabricado em GFRP e com aderência mantida com concreto, e o S2-A36-EA, feito de aço e sem aderência com o concreto, apresentaram trechos iniciais parecidos. Isso sugere que, nesse estágio inicial, o concreto nos furos, que está presente em ambos, influencia o comportamento. A partir do fim do regime elástico, entretanto, as curvas se separam de forma mais evidente. O S2-A36-EA manteve um patamar quase linear por longo trecho, devido à capacidade do aço de se manter íntegro enquanto o concreto ao redor fissurava. O S2-FRP, por outro lado, passou por processo de fissuração progressiva do GFRP, o que justifica a manutenção temporária da carga, seguida por uma queda mais acentuada, indicando o colapso do próprio conector.

Ainda na Figura 4.38b, os conectores S2-FRP-EA e S2-FRP-EA/RH, ambos sem aderência entre o GFRP e o concreto, exibiram comportamentos similares quanto à posição do pico de força e à forma geral das curvas. O S2-FRP-EA/RH atingiu um pico ligeiramente maior e manteve uma resposta quase linear após esse ponto, sugerindo que o GFRP foi explorado até o limite. Já o S2-FRP-EA apresentou um patamar linear levemente decrescente após o pico, possivelmente em função da fissuração excessiva ou do colapso localizado do concreto nos furos.

A diferença entre os dois conectores também pode ser notada no trecho inicial da curva: o S2-FRP-EA (com concreto nos furos) apresentou um comportamento levemente mais rígido que o S2-FRP-EA/RH (com aço nos furos). À primeira vista, esse resultado pode parecer contraditório, já que o aço é consideravelmente mais rígido que o concreto. No entanto, uma possível explicação está na forma como as fissuras se distribuem e se desenvolvem no sistema. No conector com concreto nos furos (S2-FRP-EA), é provável que o próprio concreto no interior dos furos tenha começado a se fissurar ao longo do carregamento, promovendo certo alívio de tensões nessa região e impedindo uma propagação mais severa de fissuras ao longo do GFRP. Isso é corroborado pela menor extensão média de fissuras observada nesse modelo (56,82 cm, segundo a Tabela 4.16). Por outro lado, no conector com aço nos furos (S2-FRP-EA/RH), o aço não apresenta fissuração alguma, mantendo-se íntegro, mas impondo maior rigidez localizada que impede o alívio de tensões nos furos, forçando o GFRP a concentrar as deformações e sofrer fissuração intensa, como demonstrado pela maior extensão média de fissuras (69,38 cm).

Desse modo, o que se observa no conjunto é que o conector com concreto nos furos parece apresentar um comportamento mais rígido no início do ensaio, justamente porque parte das tensões são absorvidas pela fissuração precoce do concreto, ao passo que o conector com aço nos furos transfere mais diretamente essas tensões ao GFRP, que atua como região preferencial de deformação do sistema. Além disso, como não há aderência entre o concreto e o GFRP, o principal elemento responsável por garantir a integridade do conector ao longo do ensaio passa a ser o próprio GFRP, que irá se deformar e influenciar diretamente na rigidez do sistema na mesma proporção em que se fissura.

4.3.3 Parâmetros mecânicos

A determinação dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 2 segue os procedimentos descritos na Seção 3.5, já aplicados na análise da Série 1. Foram considerados os principais indicadores de desempenho estrutural, tais como a força na capacidade última ($Q_{lo,u}$), o deslocamento correspondente ($S_{lo,u}$), a rigidez inicial (K_f), os coeficientes de rigidez elástico (K_e) e inelástico (K_{ie}), bem como as energias absoluta e relativa absorvidas (W_{abs} e W_{rel}). Adicionalmente, foram definidos os limites dos regimes elástico e inelástico por meio dos parâmetros $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$.

4.3.3.1 Capacidade última, deslocamento na capacidade última e rigidez inicial

A Tabela 4.17 apresenta os resultados individuais e estatísticos da capacidade última ($Q_{lo,u}$), do deslizamento correspondente ($S_{lo,u}$) e da rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 2. O conector S2-FRP é o modelo de referência, e os demais foram concebidos com alterações específicas para investigar, de forma isolada, a influência de mecanismos resistentes distintos sobre seu comportamento.

O S2-FRP, conector perfurado sem nenhuma modificação específica, apresentou capacidade última de 30,31 kN, rigidez inicial de 14,11 kN/mm e deslizamento médio de 2,77 mm. Sua resistência decorre da combinação entre aderência (ou atrito) e ancoragem do GFRP no concreto por meio dos furos.

No S2-FRP-EA, a aderência entre GFRP e concreto foi eliminada com a aplicação de uma folha de teflon, mantendo-se a geometria e o material do modelo padrão. Em relação ao S2-FRP, houve redução de 47% na capacidade última ($Q_{lo,u} = 15,96$ kN), de 77% na rigidez inicial ($K_f = 3,30$ kN/mm) e aumento de 160% no deslizamento correspondente ($S_{lo,u} = 7,19$ mm), evidenciando a importância da aderência na transferência de esforços cisalhantes.

No S2-FRP-RH, uma barra de aço foi inserida nos furos, substituindo o concreto e impedindo que ocorra fissuração ou ruptura do material originalmente presente nessa região. A aderência foi mantida. Em comparação ao S2-FRP, observou-se aumento de 11% na capacidade última ($Q_{lo,u} = 33,75$ kN), rigidez 17% menor ($K_f = 11,77$ kN/mm) e deslizamento 43% maior ($Sl_{o,u} = 3,97$ mm), refletindo que o concreto nos furos exerce influência no modo de ruptura, limitando parcialmente a deformação e contribuindo para o equilíbrio dos mecanismos resistentes.

No S2-FRP-EA/RH, foi realizada simultaneamente a eliminação da aderência e a substituição do concreto nos furos por barras de aço. O objetivo foi induzir o rompimento ao GFRP, excluindo as contribuições da interface e da ancoragem do GFRP no concreto. Em relação ao S2-FRP, houve redução de 41% na capacidade última ($Q_{lo,u} = 17,90$ kN), de 88% na rigidez ($K_f = 1,71$ kN/mm) e aumento de 716% no deslizamento ($Sl_{o,u} = 22,60$ mm). Quando comparado ao S2-FRP-EA, que possui a mesma condição de aderência eliminada, observa-se um leve ganho de capacidade última ($\approx +12\%$) e aumento do deslizamento ($\approx +214\%$), sugerindo que a inserção da barra metálica altera a forma de transmissão dos esforços e contribui para uma redistribuição das deformações no conector.

O conector S2-A36-EA, com a mesma geometria e espessura (≈ 2 mm) do S2-FRP, porém fabricado em aço, foi projetado para induzir o rompimento do concreto que passa pelos furos, uma vez que o material metálico não se rompe antes da matriz de concreto. Os resultados mostraram capacidade última praticamente igual à do modelo padrão ($Q_{lo,u} \approx 30,25$ kN), rigidez ligeiramente superior ($K_f = 14,20$ kN/mm) e deslizamento 422% maior ($Sl_{o,u} = 14,46$ mm), valor compatível com a progressiva fissuração do concreto na capacidade última.

O S2- C_{TL} , conector sem furos, foi utilizado para avaliar a resistência conferida exclusivamente pelo atrito entre o GFRP e o concreto. Em comparação ao S2-FRP, apresentou capacidade última 14% menor ($Q_{lo,u} = 26,14$ kN), rigidez semelhante ($K_f = 13,18$ kN/mm) e deslizamento ligeiramente maior ($Sl_{o,u} = 2,84$ mm), sugerindo que o atrito isolado proporciona resistência significativa, embora inferior à obtida pela atuação combinada com ancoragem e aderência.

Tabela 4.17 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 2: capacidade última (Q_{lu}), deslocamento na capacidade última (S_{lu}) e rigidez inicial (K_f): valores individuais (x_n), valores médios ($\bar{x}$), desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).

Código	Q_{lu}				S_{lu}				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S2-FRP-A	30,45				2,26				16,24			
S2-FRP-B	28,05	30,31	2,19	7,24	2,83	2,77	0,48	17,43	13,81	14,11	2,00	14,19
S2-FRP-C	32,43				3,22				12,27			
S2-FRP-EA-A	16,82				7,99				3,40			
S2-FRP-EA-B	16,80	15,96	1,47	9,19	5,88	7,19	1,14	15,88	4,04	3,30	0,80	24,27
S2-FRP-EA-C	14,27				7,69				2,45			
S2-FRP-RH-A	32,49				3,32				13,04			
S2-FRP-RH-B	36,27	33,75	2,19	6,48	4,56	3,97	0,62	15,67	10,46	11,77	1,29	10,96
S2-FRP-RH-C	32,48				4,02				11,81			
S2-FRP-EA/RH-A	17,32				27,94				1,71			
S2-FRP-EA/RH-B	17,09	17,90	1,20	6,72	20,25	22,60	4,64	20,53	1,19	1,71	0,53	30,64
S2-FRP-EA/RH-C	19,28				19,60				2,24			
S2-A36-EA-A	28,53				13,97				14,56			
S2-A36-EA-B	32,42	30,25	1,98	6,55	13,98	14,46	0,85	5,85	15,48	14,20	1,49	10,47
S2-A36-EA-C	29,81				15,44				12,57			
S2-CTL-A	27,24				3,02				13,80			
S2-CTL-B	26,04	26,14	1,05	4,03	2,49	2,84	0,31	10,76	12,49	13,18	0,66	4,99
S2-CTL-C	25,14				3,02				13,25			

Com base nas características geométricas e nos mecanismos resistentes atuantes, os conectores da Série 2 podem ser classificados de acordo com o número e o tipo de possibilidades de ruptura identificadas nos ensaios. Essa classificação permite compreender como as modificações introduzidas em cada modelo influenciam diretamente o modo de falha esperado, além de ajudar a isolar a contribuição de cada mecanismo à resistência global do sistema.

O conector S2-FRP, modelo de referência, apresenta três possibilidades de ruptura: por perda de aderência entre o concreto e o GFRP, por ruptura dos pinos de concreto (massa de concreto que atravessa os furos do conector) ou por ruptura do próprio GFRP. Como os três mecanismos estão simultaneamente presentes, as rupturas podem ocorrer de forma isolada ou combinada, a depender da distribuição de tensões e da interação entre os mecanismos resistentes.

No S2-FRP-EA, onde a aderência foi eliminada por meio da aplicação de teflon na interface GFRP-concreto, permanecem duas possibilidades de ruptura: por ruptura dos pinos de concreto ou por ruptura do GFRP. A ausência de aderência impede que essa seja uma forma ativa de transferência de esforços, mas as demais resistências permanecem em funcionamento, podendo atuar isoladamente ou em conjunto.

O conector S2-FRP-RH, por sua vez, mantém a aderência, mas substitui o concreto nos furos por barras de aço. Nessa configuração, não há risco de ruptura nos pinos de concreto (pois estes não existem), sendo as duas possibilidades de ruptura a perda de aderência ou a ruptura do GFRP, com possibilidade de ocorrência individual ou combinada.

No S2-FRP-EA/RH, a eliminação da aderência e a substituição do concreto nos furos por barras metálicas reduzem os mecanismos resistentes a uma única via: a ruptura do GFRP. Assim, trata-se de um modelo com apenas uma possibilidade de ruptura, projetado exatamente para isolar e provocar a falha no corpo do conector.

Já o S2-A36-EA, com geometria semelhante ao S2-FRP, porém fabricado em aço e com aderência eliminada, foi concebido para que a única forma possível de ruptura fosse no concreto ao redor dos furos. Dessa forma, esse conector também apresenta uma única possibilidade de ruptura, que é a ruptura nos pinos de concreto.

Por fim, o conector S2- C_{TL} , que não possui furos, depende exclusivamente do atrito entre GFRP e concreto. Nessa condição, a única possibilidade de ruptura é a perda de aderência (ou atrito), uma vez que não há mecanismo de ancoragem nem transferência por pinos. Assim, também se enquadra na categoria de conectores com apenas uma possibilidade de ruptura.

A Figura 4.39 apresenta a comparação das capacidades últimas dos conectores da Série 2, classificados de acordo com o número de possibilidades de ruptura associadas a cada modelo. O gráfico (a) reúne os conectores com três ou duas possibilidades de ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH), enquanto o gráfico (b) mostra aqueles com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

No gráfico (a), o conector S2-FRP, modelo de referência com possibilidade de ruptura por perda de aderência, ruptura dos pinos de concreto ou ruptura do GFRP, apresentou capacidade última de 30,31 kN. A eliminação da aderência no S2-FRP-EA, mantendo os demais mecanismos, reduziu a resistência para 15,96 kN (-47%), o que destaca a relevância da interface entre GFRP e concreto no desempenho global. Por outro lado, a substituição do concreto nos furos por aço no conector S2-FRP-RH, mantendo a aderência, resultou em um acréscimo de resistência, alcançando 33,75 kN (+11% em relação ao S2-FRP). Esse aumento indica que a presença do concreto nos furos, embora contribua para a ancoragem, pode também atuar como elemento de limitação quando comparado ao uso do aço, que evita o colapso prematuro nessa região.

No gráfico (b), todos os conectores foram concebidos para apresentar apenas uma forma de ruptura possível. O conector S2-FRP-EA/RH, cuja ruptura ocorre exclusivamente no GFRP, atingiu 17,90 kN, valor inferior ao do modelo padrão, o que evidencia as limitações de resistência quando os demais mecanismos são eliminados. O S2-A36-EA, projetado para induzir o rompimento nos pinos de concreto, apresentou capacidade de 30,25 kN, muito próxima à do S2-FRP, demonstrando que a falha no concreto ao redor dos furos é um mecanismo resistente significativo. Por fim, o conector S2-CTL, sem furos e com resistência baseada apenas no atrito entre GFRP e concreto, apresentou capacidade de 26,14 kN, desempenho inferior ao do modelo com atuação conjunta, mas ainda representativo.

Os resultados obtidos indicam que o fator com maior influência sobre a capacidade última dos conectores é a aderência entre o GFRP e o concreto. A comparação entre os modelos modificados revela que a eliminação desse mecanismo, como no conector S2-FRP-EA, resultou em uma redução de 47% na resistência em relação ao conector de referência S2-FRP, mesmo com a geometria e os furos preservados. Por outro lado, a substituição do concreto nos furos por barras de aço, como no modelo S2-FRP-RH, não apenas manteve a resistência como a elevou em 11%, desde que a aderência fosse preservada. Esses dados mostram que a perda da aderência compromete significativamente a capacidade resistente do sistema, mais do que a ausência de concreto nos furos, evidenciando que a interface GFRP-concreto é o principal meio de transferência de esforços cisalhantes na maioria dos modelos analisados.

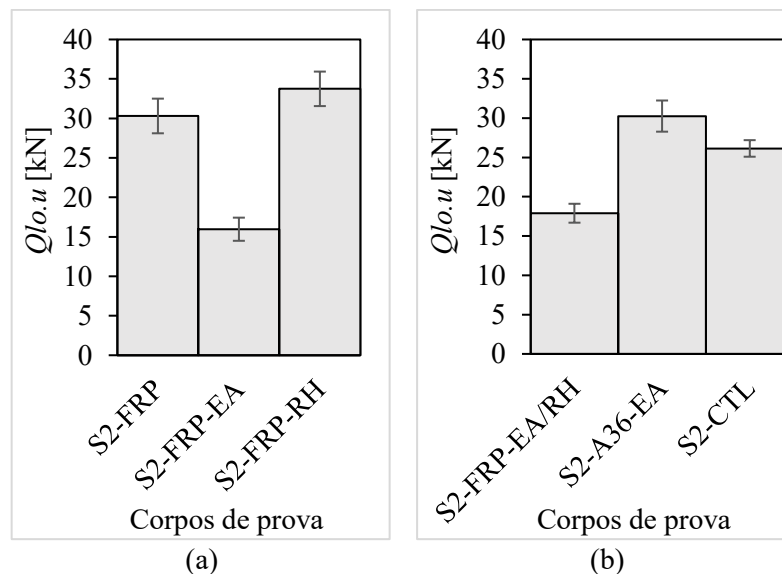


Figura 4.39 – Capacidade última dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

A Figura 4.40 apresenta os valores médios de deslizamento na capacidade última ($Sl_{o,u}$) dos conectores da Série 2, organizados segundo a quantidade de mecanismos resistentes passíveis de ruptura. No gráfico (a), estão os conectores com três ou duas possibilidades de ruptura: S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH. Já o gráfico (b) exhibe os modelos com apenas uma possibilidade de ruptura: S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL.

No gráfico (a), o conector S2-FRP, com todos os mecanismos resistentes atuando (aderência, ancoragem por furos e resistência do GFRP), apresentou deslizamento médio de 2,77 mm. Com a eliminação da aderência no modelo S2-FRP-EA, esse valor aumentou para 7,19 mm (+160%), indicando que a perda da interface aderente permite maior movimentação relativa entre o conector e o concreto. Já no S2-FRP-RH, com substituição do concreto nos furos por barras de aço e manutenção da aderência, o deslizamento foi de 3,97 mm (+43% em relação ao S2-FRP), o que sugere que a presença do aço, embora evite fissuração local, não impede o acúmulo de deformações.

No gráfico (b), observam-se os maiores valores de deslizamento da série. O conector S2-FRP-EA/RH, com atuação exclusiva do GFRP, atingiu o maior valor, 22,60 mm (+716% em relação ao S2-FRP), evidenciando o caráter altamente deformável do sistema quando eliminadas tanto a aderência quanto a ancoragem. O S2-A36-EA, cuja falha ocorre exclusivamente nos pinos de concreto, apresentou deslizamento de 14,46 mm (+422%), valor coerente com a progressiva fissuração do concreto até o colapso. Por fim, o S2-CTL, cuja resistência depende apenas do atrito superficial entre GFRP e concreto, apresentou deslizamento de 2,84 mm, valor muito próximo ao do S2-FRP (+3%), indicando que, embora

limitado em termos de capacidade, o atrito proporciona confinamento suficiente para restringir deslocamentos até o instante de ruptura.

Os resultados da Figura 4.40 indicam que a eliminação da aderência é o fator que mais influencia o aumento do deslizamento nos conectores, especialmente quando associada à remoção do concreto nos furos. Modelos com atuação exclusiva de um único mecanismo, como o GFRP ou os pinos de concreto, tendem a apresentar deformações mais expressivas, enquanto a combinação dos mecanismos atua de forma sinérgica na contenção dos deslocamentos relativos.

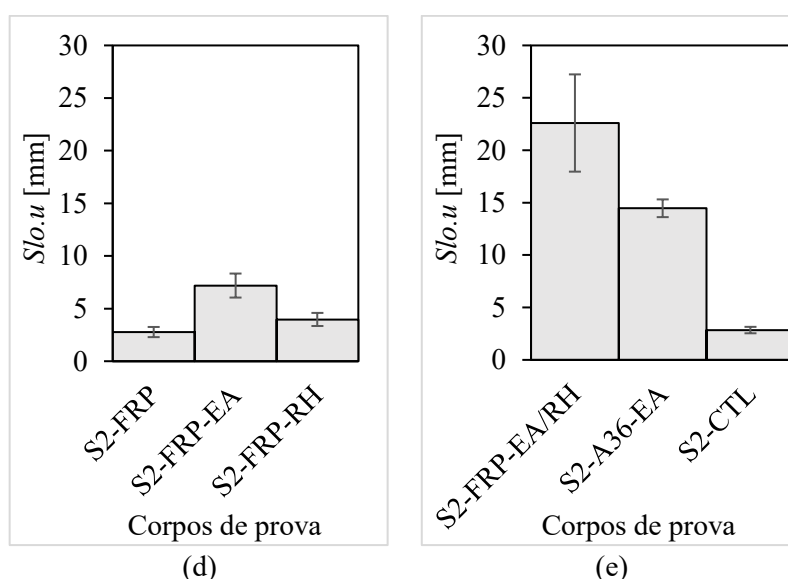


Figura 4.40 – Deslizamento na capacidade última dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

A Figura 4.41 apresenta os valores médios de rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 2, classificados de acordo com o número de mecanismos resistentes passíveis de ruptura. O gráfico (a) mostra os conectores com três ou duas possibilidades de ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH), enquanto o gráfico (b) contempla os modelos com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

No gráfico (a), o conector S2-FRP, que combina aderência, ancoragem por furos e resistência do GFRP, apresentou rigidez inicial de 14,11 kN/mm, valor de referência para comparação. Com a eliminação da aderência, o modelo S2-FRP-EA apresentou rigidez inicial de 3,30 kN/mm, resultando em uma redução de 77%. Esse comportamento evidencia que a interação superficial entre o GFRP e o concreto é fundamental para restringir deslocamentos iniciais. O conector S2-FRP-RH, com os furos preenchidos com barras de aço e mantendo a aderência, apresentou rigidez de 11,77 kN/mm, ou seja, 17% inferior à do S2-FRP, indicando

que a substituição do concreto por aço nos furos reduz ligeiramente a rigidez inicial, ainda que mantenha bom desempenho.

No gráfico (b), o modelo S2-FRP-EA/RH, que exclui tanto a aderência quanto o concreto nos furos, apresentou a menor rigidez da série, com valor médio de 1,71 kN/mm, o que representa uma queda de 88% em relação ao S2-FRP. O conector S2-A36-EA, fabricado em aço e projetado para induzir ruptura no concreto ao redor dos furos, obteve rigidez de 14,20 kN/mm, valor ligeiramente superior ao do modelo de referência, o que pode estar relacionado à elevada rigidez do material metálico que compõe o conector. Já o conector S2-CTL, sem furos e cuja resistência se dá exclusivamente por atrito, apresentou rigidez inicial de 13,18 kN/mm, muito próxima à do S2-FRP (-7%), o que demonstra que o atrito é um mecanismo eficiente para limitar os deslocamentos iniciais, mesmo na ausência de ancoragem por furos.

Os resultados da Figura 4.41 indicam que a aderência entre GFRP e concreto é o fator que mais contribui para o aumento da rigidez inicial dos conectores. Sua eliminação leva a reduções acentuadas na rigidez, mesmo quando mantidos outros mecanismos resistentes, como a presença de concreto ou aço nos furos. Já a presença da ancoragem por furos ou de materiais com elevada rigidez (como o aço) pode atenuar parcialmente essa perda, mas não compensa totalmente a ausência da interface aderente.

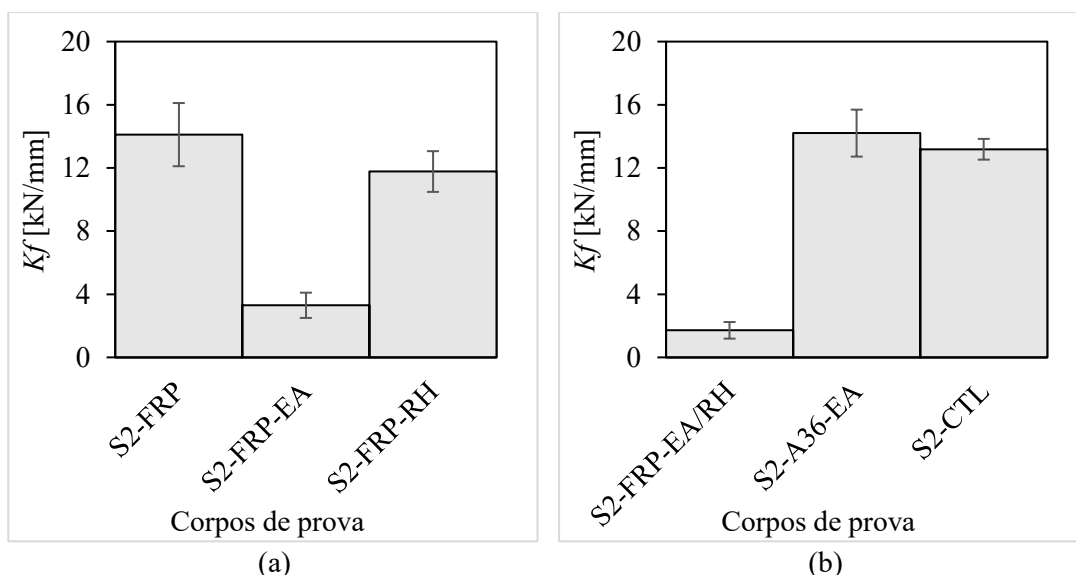


Figura 4.41 – Rigidez inicial dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

4.3.3.2 Energia absorvida absoluta e relativa

A análise da energia absorvida pelos conectores fornece informações complementares ao comportamento mecânico avaliado por meio da capacidade última, rigidez e deslizamento. A energia absoluta absorvida (W_{abs}) representa a área sob a curva força–deslocamento até o final do ensaio, expressando a quantidade total de energia dissipada pelo sistema ao longo de toda a aplicação da força. Já a energia relativa absorvida (W_{rel}) corresponde à energia dissipada por unidade de força máxima, permitindo uma avaliação normalizada da capacidade de deformação dos conectores em relação à sua resistência. Esses parâmetros contribuem para a compreensão da ductilidade dos conectores e da forma como diferentes mecanismos resistentes influenciam a dissipação de energia.

A Tabela 4.18 apresenta os resultados individuais e estatísticos de W_{abs} e W_{rel} dos conectores da Série 2. O conector S2-FRP, modelo de referência com atuação simultânea da aderência, da ancoragem nos furos e da resistência do GFRP, apresentou energia absoluta média de 272,91 kN·mm e energia relativa de 8,98 kN·mm/kN.

No modelo S2-FRP-EA, com eliminação da aderência, observou-se um aumento na energia absoluta para 303,66 kN·mm (+11%) e uma elevação acentuada na energia relativa, que atingiu 18,94 kN·mm/kN (+111%). Esse comportamento evidencia que a remoção da aderência entre o GFRP e o concreto permitiu maior deformação do conector, o que resultou em aumento significativo da energia dissipada por unidade de força máxima.

Por outro lado, o conector S2-FRP-RH, no qual barras de aço foram posicionadas nos furos, mantendo-se a aderência entre GFRP e concreto, apresentou a menor energia absoluta da série (159,85 kN·mm, -41%) e energia relativa de 4,75 kN·mm/kN (-47%). Esse resultado sugere que, apesar do leve ganho em capacidade última, houve limitação no acúmulo de deformações, o que reduziu a quantidade de energia dissipada.

O modelo S2-FRP-EA/RH, que reúne a eliminação da aderência e a substituição do concreto nos furos por barras de aço, apresentou energia absoluta de 454,75 kN·mm (+67%) e energia relativa de 25,32 kN·mm/kN (+182%), ambos os maiores valores entre os conectores de GFRP. Esse comportamento confirma que a concentração da deformação no GFRP, sem as contribuições da aderência e do concreto nos furos, favorece a dissipação de energia ao longo da aplicação da força.

O conector metálico S2-A36-EA, cuja falha ocorre no concreto nos furos, apresentou os valores mais elevados da série: 930,19 kN·mm de energia absoluta e 30,69 kN·mm/kN de energia relativa. Como o material do conector não rompe, a falha do sistema é controlada pelo comportamento do concreto. Nesse caso, a propagação das fissuras

tem início nos furos e se estende pelas regiões adjacentes, sendo controlada pela presença da armadura, que restringe a abertura das fissuras e contribui para a ductilidade do sistema.

Por fim, o conector S2- C_{TL} , baseado apenas no atrito superficial entre GFRP e concreto, apresentou energia absoluta de 275,80 kN·mm (praticamente igual à do S2-FRP) e energia relativa de 10,56 kN·mm/kN. Os resultados da Tabela 4.18 demonstram que a eliminação da aderência tende a aumentar a energia relativa. Por outro lado, a presença de mecanismos que restringem a deformação, como o reforço metálico nos furos ou a combinação com aderência, pode reduzir significativamente a dissipação de energia. Assim, os parâmetros de energia permitem distinguir conectores mais deformáveis e com maior capacidade de absorção, mesmo quando suas resistências últimas são mais baixas.

Tabela 4.18 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 2: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN.mm]	x [kN.mm]	s [kN.mm]	c_v [%]	x_n [kN.mm/kN]	x [kN.mm/kN]	s [kN.mm/kN]	c_v [%]
S2-FRP-A	261,01				8,57			
S2-FRP-B	244,29	272,91	36,07	13,22	8,71	8,98	0,60	6,63
S2-FRP-C	313,42				9,66			
S2-FRP-EA-A	397,71				23,65			
S2-FRP-EA-B	264,96	303,66	81,87	26,96	15,77	18,94	4,16	21,94
S2-FRP-EA-C	248,31				17,40			
S2-FRP-RH-A	166,19				5,12			
S2-FRP-RH-B	157,52	159,85	5,56	3,48	4,34	4,75	0,39	8,17
S2-FRP-RH-C	155,83				4,80			
S2-FRP-EA/RH-A	387,17				22,35			
S2-FRP-EA/RH-B	441,30	454,75	75,21	16,54	25,82	25,32	2,75	10,87
S2-FRP-EA/RH-C	535,78				27,79			
S2-A36-EA-A	837,50				29,36			
S2-A36-EA-B	1.038,92	930,19	101,66	10,93	32,05	30,69	1,35	4,38
S2-A36-EA-C	914,16				30,67			
S2-CTL-A	289,85				10,64			
S2-CTL-B	255,79	275,80	17,79	6,45	9,82	10,56	0,70	6,59
S2-CTL-C	281,75				11,21			

A Figura 4.42 apresenta a energia absoluta absorvida (W_{abs}) pelos conectores da Série 2, com destaque para os valores médios e respectivas barras de erro, calculadas com base nos desvios-padrão. No grupo de conectores com três possibilidades de ruptura (Figura 4.42a), o S2-FRP-EA obteve o maior valor médio de energia (303,66 kN·mm), superando o conector de referência S2-FRP (272,91 kN·mm), enquanto o S2-FRP-RH apresentou a menor dissipação (159,85 kN·mm). Esses resultados reforçam que a eliminação da aderência, ao permitir maior deformabilidade do GFRP, favorece o aumento da energia dissipada, mesmo com redução na capacidade última.

Na Figura 4.42b, composta por conectores com apenas uma possibilidade de ruptura, destaca-se o valor elevado de energia absorvida do S2-A36-EA (930,19 kN·mm), o maior de toda a série. Isso se deve à não ruptura do conector metálico, o que transfere o colapso para o concreto nos furos, permitindo a propagação de fissuras controladas pela armadura. O S2-FRP-EA/RH também apresentou dissipação expressiva (454,75 kN·mm), superior aos conectores de três mecanismos, em função da concentração da deformação no GFRP. O S2- C_{TL} , por sua vez, mostrou valor próximo ao do S2-FRP (275,80 kN·mm), indicando que o atrito superficial, embora limitado, ainda permite significativa absorção de energia.

A comparação entre os grupos evidencia que a restrição ou liberação dos mecanismos resistentes (aderência, ancoragem e resistência do material) afeta diretamente a capacidade de dissipação de energia dos conectores. Além disso, a variação nos desvios-padrão, notadamente mais elevados nos modelos com deformabilidade acentuada (como S2-FRP-EA e S2-FRP-EA/RH), indica maior sensibilidade dessas configurações às variações geométricas e aos processos locais de fissuração.

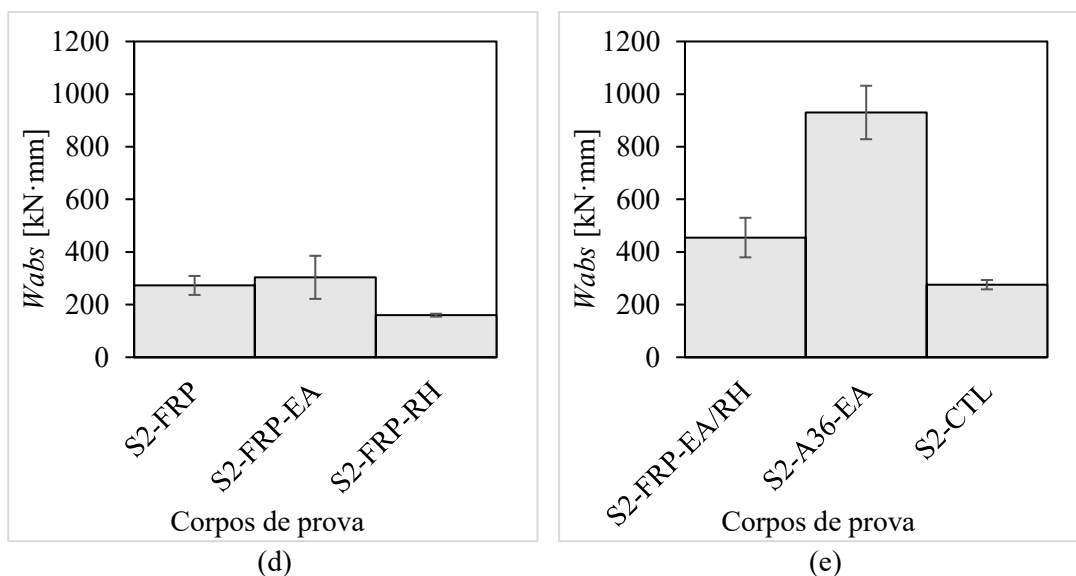


Figura 4.42 – Energia absoluta absorvida dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

A Figura 4.43 apresenta os valores médios da energia relativa absorvida (W_{rel}) pelos conectores da Série 2, acompanhados das respectivas barras de erro. Esse parâmetro permite avaliar a capacidade de dissipação de energia por unidade de força máxima, fornecendo uma medida comparativa da deformabilidade específica dos conectores, independentemente de suas resistências últimas.

Na Figura 4.43a, referente aos conectores com três possibilidades de ruptura, observa-se que o modelo S2-FRP-EA, com eliminação da aderência, apresentou a maior energia relativa do grupo (18,94 $\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$), com desvio-padrão relativamente elevado. Esse resultado destaca que a ausência de aderência potencializa a deformação do GFRP, elevando a dissipação de energia por força máxima aplicada. O conector de referência S2-FRP apresentou valor intermediário (8,98 $\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$), enquanto o S2-FRP-RH, com barras de aço nos furos e aderência preservada, resultou no menor valor da série (4,75 $\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$), evidenciando que a presença dos mecanismos de restrição à deformação reduz a eficiência relativa na absorção de energia.

Na Figura 4.43b, que inclui conectores com apenas uma possibilidade de ruptura, os maiores valores foram observados nos conectores S2-A36-EA (30,69 $\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$) e S2-FRP-EA/RH (25,32 $\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{kN}$), ambos com elevada deformabilidade e força máxima moderada, resultando em uma dissipação proporcionalmente acentuada. No primeiro caso, a propagação progressiva de fissuras no concreto contribuiu para esse comportamento, enquanto no segundo, a ausência simultânea da aderência e do concreto nos furos concentrou a

deformação no GFRP. O S2-CTL, por outro lado, apresentou valor próximo ao do modelo padrão (10,56 kN·mm/kN), indicando que a transferência de esforços exclusivamente por atrito, embora limitada, mantém uma capacidade relativa de absorção expressiva.

A Figura 4.43 reforça que a eliminação da aderência, isoladamente ou combinada à colocação de barras de aço nos furos, está associada aos maiores valores de energia relativa, ao passo que a presença de elementos de reforço ou restrição ao deslocamento, como barras de aço ou aderência preservada, tende a reduzir a deformabilidade específica dos conectores. Essa distinção é útil para identificar configurações mais adequadas em situações nas quais se deseja avaliar o limite último de trabalho, com ênfase no controle das deformações, mas sem comprometer significativamente a força máxima suportada pelo sistema.

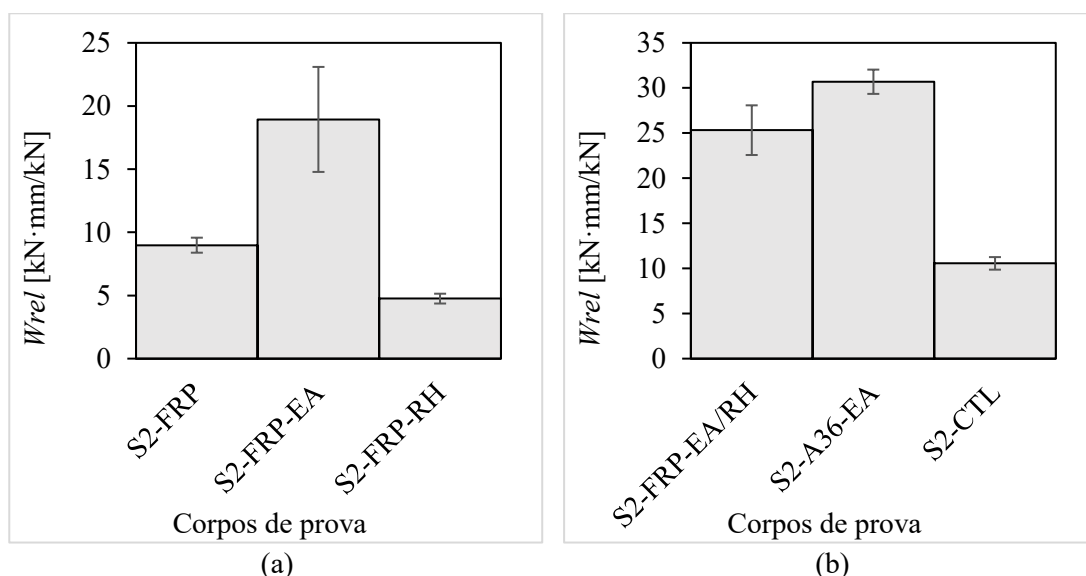


Figura 4.43 – Energia relativa absorvida dos conectores da Série 2: (a) conectores com três possibilidades ruptura (S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH); (b) conectores com apenas uma possibilidade de ruptura (S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL).

4.3.4 Avaliação da ductilidade

A avaliação da ductilidade dos conectores foi realizada conforme os critérios estabelecidos na norma prEN 1994-1-1 (EUROCODE, 2024), os quais se baseiam na análise da curva força–deslizamento em termos da rigidez inicial (K_f), do deslizamento na resistência característica (δ_{ek}) e do deslizamento final na capacidade última (δ_{uk}). A classificação considera três categorias: D3 (mais dúctil), D2 (ductilidade intermediária) e D1 (frágil). Em alguns casos, os parâmetros obtidos se aproximaram dos critérios definidos, mas não os atenderam integralmente, devido ao valor de δ_{ek} exceder o limite estipulado. Nesses casos, optou-se por uma classificação aproximada, que indica comportamento compatível com a respectiva categoria de ductilidade, mas com ressalvas quanto ao desempenho no regime elástico. Embora

essas aproximações indiquem tendência favorável à ductilidade global do conector, também podem representar uma limitação do ponto de vista do estado limite de serviço, por estarem associadas a maiores deformações iniciais.

A Tabela 4.19 apresenta os principais parâmetros extraídos das curvas força–deslizamento dos conectores da Série 2, com suas respectivas classificações segundo a norma. O conector S2-FRP foi classificado como D2, com $\delta_{ek} = 1,74$ mm e $\delta_{uk} = 8,32$ mm, refletindo comportamento moderadamente dúctil. O S2-FRP-EA apresentou deslizamento elevado tanto no início ($\delta_{ek} = 3,88$ mm) quanto na capacidade última ($\delta_{uk} = 12,80$ mm), o que inviabilizou a classificação formal como D3, mas justifica sua categorização como ~D3, indicando comportamento próximo ao desejado para elevada ductilidade. O conector S2-FRP-RH, por sua vez, apresentou δ_{ek} levemente acima do limite e δ_{uk} abaixo de 6 mm, sendo classificado como ~D1, com comportamento predominantemente frágil, mas com início de resposta moderadamente deformável.

No segundo grupo, o conector S2-FRP-EA/RH atingiu $\delta_{uk} = 27,07$ mm, mas com $\delta_{ek} = 8,86$ mm, muito superior ao limite normativo, o que resultou em classificação ~D3, com comportamento altamente deformável, porém com prejuízo à resposta inicial. Já o S2-A36-EA atendeu integralmente aos critérios da categoria D3, com $\delta_{ek} = 1,85$ mm e $\delta_{uk} = 27,58$ mm, indicando comportamento altamente dúctil e estável. Por fim, o S2-CTL foi classificado como D1, com δ_{uk} de apenas 3,21 mm, revelando comportamento frágil, dominado pelo atrito na interface entre GFRP e concreto, sem mecanismos adicionais de ancoragem.

Tabela 4.19 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 2 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).

Identificação	P_e [kN]	P_{Rk} [kN]	δ_{ek} [mm]	δ_{uk} [mm]	K_f [kN/mm]	Categoria de ductilidade
S2-FRP	28,28	25,45	1,74	8,32	14,60	D2
S2-FRP-EA	14,85	13,37	3,88	12,80	3,45	~D3
S2-FRP-RH	33,55	30,20	2,62	4,60	11,52	~D1
S2-FRP-EA/RH	18,10	16,29	8,86	27,07	1,84	~D3
S2-A36-EA	31,05	27,95	1,85	27,58	15,11	D3
S2-CTL	25,51	22,96	1,72	3,21	13,34	D1

A Figura 4.44 ilustra, de forma esquemática, a modelagem das curvas força–deslizamento utilizada para a classificação dos conectores. Na parte (a), observa-se que o conector S2-FRP, classificado como D2, apresentou uma curva com platô estável após a força característica, sem atingir deslizamentos superiores a 10 mm. O S2-FRP-EA, com resposta mais

deformável, exibiu grande alongamento horizontal após o pico, justificando a classificação ~D3, enquanto o S2-FRP-RH, apesar de alcançar força elevada, apresentou δ_{uk} limitado e pouco prolongamento da curva, compatível com um comportamento ~D1.

Na parte (b), destacam-se os modelos com ductilidade mais pronunciada. O conector S2-FRP-EA/RH alcançou grande deslizamento final, mas com início excessivamente deformável, resultando em classificação ~D3. O S2-A36-EA, com curva linear seguida de platô e alongamento expressivo, preencheu integralmente os critérios da categoria D3. Já o S2-CTL apresentou uma curva com deslocamento final reduzido e rápida estabilização após o pico, confirmando a classificação D1 e indicando comportamento frágil e pouco deformável.

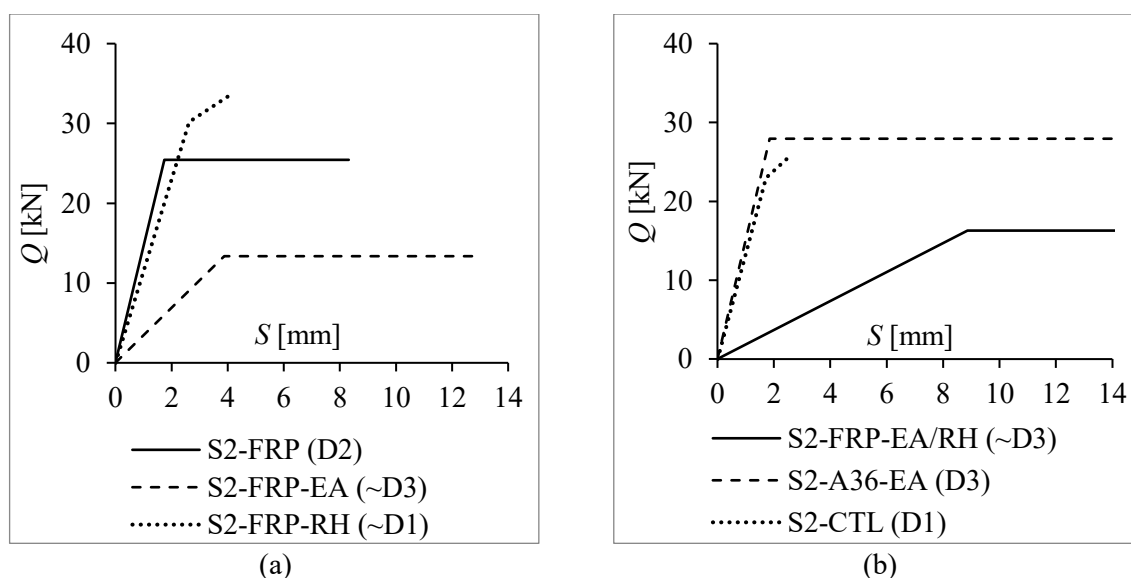


Figura 4.44 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 2: (a) S2-FRP, S2-FRP-EA e S2-FRP-RH; e (b) S2-FRP-EA/RH, S2-A36-EA e S2-CTL.

Com base nos critérios normativos adotados, foi possível classificar adequadamente o comportamento dos conectores da Série 2 em termos de ductilidade, evidenciando a influência dos mecanismos resistentes e das configurações geométricas sobre a forma da curva força-deslizamento. Os conectores com ancoragem eficiente e rigidez preservada, como o S2-A36-EA, demonstraram desempenho plenamente dúctil, enquanto aqueles com ausência de aderência ou atuação restrita ao atrito, como o S2-FRP-EA/RH e o S2-CTL, apresentaram comportamentos extremos, com elevada deformabilidade ou fragilidade acentuada, respectivamente. Os casos classificados de forma aproximada reforçam a sensibilidade do parâmetro δ_{ek} na avaliação do regime elástico e alertam para os impactos dessas variações no desempenho em serviço. De modo geral, a aplicação dos critérios da prEN 1994-1-1 permitiu não apenas diferenciar os conectores quanto à sua capacidade de deformação após o limite

elástico, mas também fornecer subsídios técnicos relevantes para decisões de projeto que envolvam critérios de segurança, desempenho em serviço e capacidade de redistribuição de esforços.

4.4 Série 3: avaliação do efeito da espessura do reforço em FRP na região entre as camadas de concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

Este tópico apresenta os resultados obtidos na Série 3, a qual teve como foco avaliar o comportamento de conectores de GFRP submetidos a diferentes espessuras de reforço aplicadas na região de GFRP na região entre camadas de concreto. O objetivo foi identificar se o aumento da espessura do enrijecedor poderia garantir que o rompimento não ocorra nessa região e, conseqüentemente, favorecer um comportamento mais dúctil do conector.

Para tanto, foram utilizadas chapas adicionais de GFRP coladas sobre a área exposta, fabricadas a partir do mesmo lote das chapas dos conectores e fixadas com a mesma resina empregada na confecção dos conectores. A configuração geométrica dos conectores da Série 3 manteve o diâmetro dos furos e o mesmo espaçamento adotados na Série 2, para efeitos de comparação. Foram avaliados cinco modelos com espessuras de reforço variando entre 0 mm e 8 mm, cujos códigos de identificação seguem a nomenclatura “S3- t_r ”, onde t_r representa a espessura do reforço em milímetros. Cada modelo contou com três réplicas, totalizando quinze ensaios.

Assim, a validade dos resultados obtidos na Série 3 restringe-se às condições experimentais adotadas, em que apenas a espessura do reforço em GFRP foi variada, mantendo-se constantes as demais características geométricas e de ensaio previamente definidas na Série 2. Portanto, as conclusões apresentadas neste capítulo não devem ser extrapoladas diretamente para conectores com diâmetros de furos, espaçamentos ou materiais distintos daqueles aqui investigados.

Com base nos resultados experimentais de capacidade última obtidos na Série 3, foi desenvolvido o modelo analítico apresentado nos tópicos 5.2.1 e 5.2.4. Esse modelo utilizou a variação controlada da espessura do reforço na região exposta para definir uma relação entre a razão geométrica R (t_{exp}/t_{con}) e a capacidade resistente, permitindo quantificar o efeito do enrijecimento sobre o desempenho ao cisalhamento dos conectores do tipo PERFOFRP.

Nos tópicos a seguir, são apresentados os resultados experimentais quanto aos padrões de fissuração, curvas força versus deslizamento relativo e parâmetros mecânicos obtidos, seguidos da avaliação da ductilidade dos conectores reforçados.

4.4.1 Padrões de fissuração

A observação dos padrões de fissuração é fundamental para compreender os modos de ruptura associados aos diferentes níveis de enrijecimento aplicados na região de GFRP na região entre camadas de concreto dos conectores da Série 3. A análise qualitativa das fissuras permite identificar em que local do conector as tensões de maior magnitude se concentram e, assim, avaliar a eficácia dos reforços em redirecionar o mecanismo de falha para regiões estruturalmente mais favoráveis. A Figura 4.45 apresenta os padrões de fissuração observados nas três réplicas de cada um dos cinco modelos testados.

Nos conectores S3-0, que não possuem enrijecedor, observaram-se fissuras inclinadas a aproximadamente 45° na região de GFRP na região entre camadas de concreto. Esse padrão de ruptura é condizente com o comportamento esperado para conectores mais frágeis, nos quais não há elementos adicionais de reforço capazes de redirecionar as tensões.

Com a introdução de um reforço de 2 mm nos modelos S3-2, os padrões de fissuração passaram a apresentar maior variabilidade. Nas réplicas S3-2-A e S3-2-B, as fissuras se desenvolveram na forma de fissuras verticais e/ou inclinadas atravessando os furos, enquanto na réplica S3-2-C foi identificada uma fissura vertical na borda interna do conector, ou seja, na interface GFRP/concreto, acompanhada de fissuras inclinadas. Esses resultados sugerem o início de um redirecionamento das tensões para regiões mais internas do conector. Nos conectores S3-4, as fissuras continuaram a se desenvolver na forma de trincas verticais e/ou inclinadas atravessando os furos, o que indica que a espessura intermediária do reforço já contribui para uma dispersão mais efetiva das tensões ao longo do conector.

A partir dos modelos S3-6, verifica-se uma mudança no comportamento de fissuração. As trincas passaram a ocorrer majoritariamente na forma de fissuras verticais localizadas na borda interna do conector, frequentemente associadas a fissuras inclinadas nos furos. Esse padrão sugere uma transição no modo de ruptura, com maior participação da região de interface GFRP/concreto no processo de falha.

Nos conectores S3-8, com a maior espessura de reforço testada, as fissuras tornam-se predominantemente verticais e concentradas na borda interna do conector. Essa configuração indica uma concentração de tensões nessa região, possivelmente ocasionada pela descontinuidade geométrica criada pela mudança brusca de espessura entre a parte reforçada e a porção ancorada do conector.

De modo geral, os resultados apresentados na Figura 4.45 evidenciam que é fundamental evitar o rompimento na região de GFRP na região entre camadas de concreto, o que pode ser alcançado pela aplicação de chapas de aço ou reforços adicionais. Contudo, o

aumento excessivo da espessura do reforço pode induzir a uma nova concentração de tensões na borda interna do conector, promovendo o surgimento de fissuras indesejadas nessa interface. Essa condição também não é favorável, uma vez que o comportamento mais adequado para os conectores é aquele em que ocorrem fissurações mais distribuídas ao longo da região de GFRP confinado no concreto, característica que tende a promover um desempenho mais dúctil e seguro para o sistema conector-concreto.

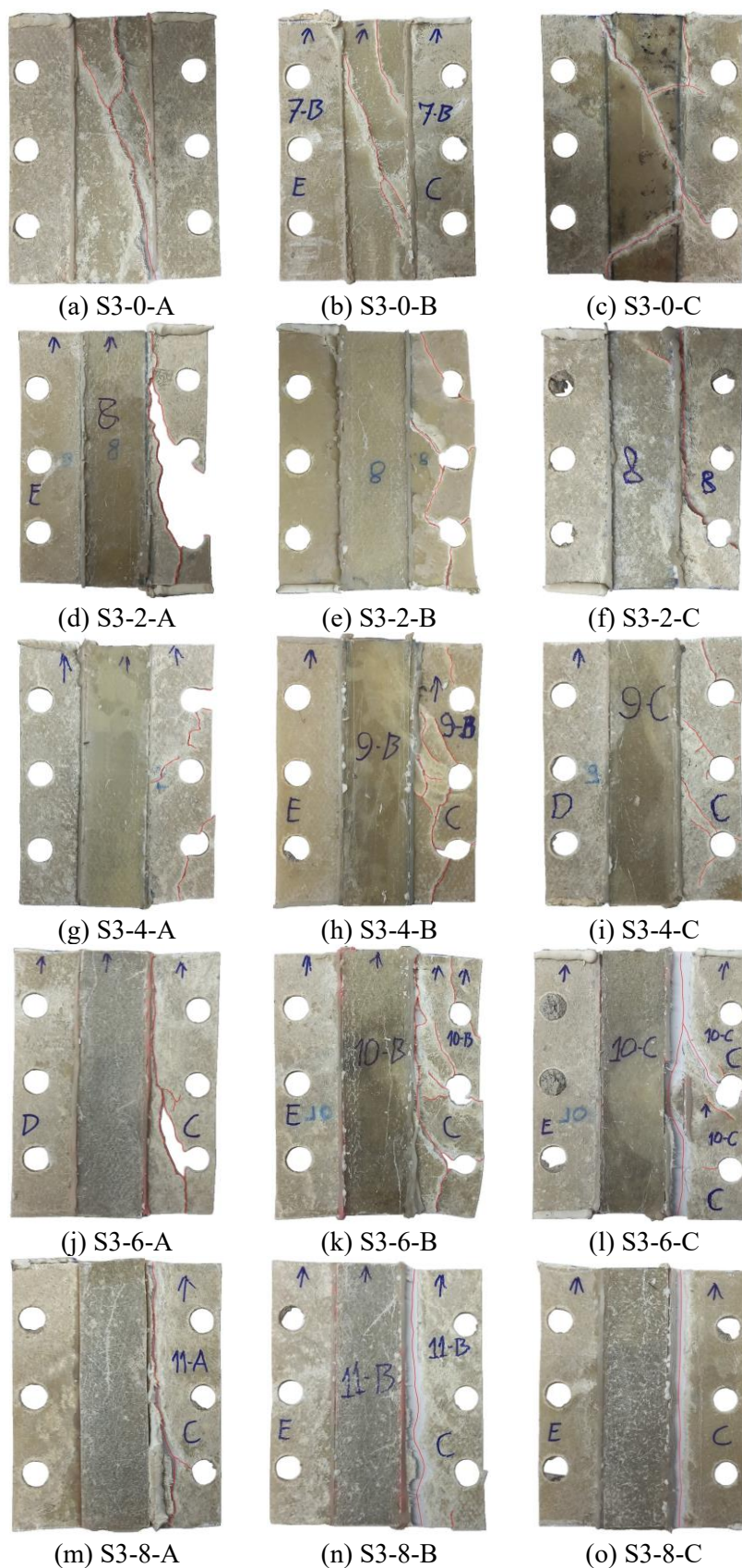


Figura 4.45 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 3: (a) S3-0-A; (b) S3-0-B; (c) S3-0-C; (d) S3-2-A; (e) S3-2-B; (f) S3-2-C; (g) S3-4-A; (h) S3-4-B; (i) S3-4-C; (j) S3-6-A; (k) S3-6-B; (l) S3-6-C; (m) S3-8-A; (n) S3-8-B; e (o) S3-8-C.

A Tabela 4.20 apresenta os valores individuais, as médias ($\bar{x}$), os desvios-padrão (s) e os coeficientes de variação (c_v) da extensão das fissuras (l_f) observadas nos conectores da Série 3. Os dados revelam uma considerável variabilidade entre os modelos. O conector S3-0, sem enrijecedor, apresentou média elevada (32,33 cm) e c_v de 20,58%. Já os modelos S3-2 e S3-4 mostraram médias inferiores (22,91 cm e 21,11 cm, respectivamente), mas com maior dispersão, especialmente no S3-4 (c_v de 31,94%). O conector S3-6 teve a maior média de fissuração (34,20 cm), enquanto o S3-8, com reforço mais espesso, apresentou a menor média (21,26 cm) e o comportamento mais uniforme entre as réplicas (c_v de apenas 6,38%).

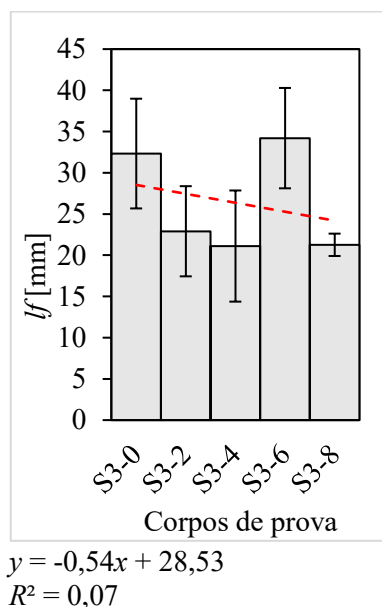
Tabela 4.20 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 3: valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação por configuração de conector.

Código	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]
S3-0-A	32,32			
S3-0-B	25,68	32,33	6,66	20,58
S3-0-C	38,99			
S3-2-A	29,19			
S3-2-B	20,34	22,91	5,47	23,88
S3-2-C	19,19			
S3-4-A	14,40			
S3-4-B	27,89	21,11	6,74	31,94
S3-4-C	21,05			
S3-6-A	29,18			
S3-6-B	40,97	34,20	6,08	17,79
S3-6-C	32,46			
S3-8-A	22,60			
S3-8-B	21,30	21,26	1,36	6,38
S3-8-C	19,89			

A Figura 4.46 apresenta graficamente a variação da extensão média das fissuras em função da espessura do enrijecedor (t_r), com barras de erro representando os desvios-padrão de cada grupo. Visualmente, não se observa uma tendência clara os valores. Apesar da tentativa de ajuste por regressão linear, a equação obtida ($y = -0,54x + 28,53$) resultou em um coeficiente de determinação muito baixo ($R^2 = 0,07$), indicando ausência de correlação estatisticamente significativa.

De modo geral, tanto a tabela quanto o gráfico mostram que a variação da espessura do reforço não gerou um padrão consistente ou previsível de fissuração nos conectores. Ainda que a dispersão dos dados tenha sido razoável em diversos casos, os resultados não permitem estabelecer uma relação direta entre o enrijecimento e a extensão das fissuras. A única evidência

significativa foi observada na análise qualitativa dos modos de fissuração, apresentada na Figura 4.45, que indicou tendências importantes quanto à localização e ao tipo de ruptura.



(a)

Figura 4.46 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (t_r).

4.4.2 Carregamento versus deslizamento relativo

A avaliação do comportamento força versus deslizamento relativo permite compreender, de forma mais detalhada, a resposta mecânica dos conectores da Série 3 ao longo de todo o processo de carregamento. A análise dessas curvas possibilita identificar alterações na rigidez, na ductilidade e na progressão do dano nos diferentes modelos ensaiados, em função da espessura do enrijecedor aplicado na região de GFRP na região entre camadas de concreto. Neste tópico, são apresentados inicialmente os gráficos individuais de cada configuração e, em seguida, os gráficos comparativos, os quais auxiliam na visualização das tendências globais de comportamento estrutural entre os modelos analisados.

4.4.2.1 Gráficos individuais

A Figura 4.47 apresenta as curvas força versus deslizamento relativo dos conectores da Série 3, obtidas a partir das réplicas de cada configuração. A análise dessas curvas permite observar a consistência dos resultados experimentais e avaliar o efeito da espessura do enrijecedor sobre o comportamento mecânico dos conectores. De maneira geral, nota-se boa concordância entre as réplicas, com curvas próximas entre si em todas as configurações

analisadas. Esse aspecto reforça a reprodutibilidade dos ensaios e a confiabilidade dos dados obtidos.

O conector S3-0, sem enrijecedor, apresentou comportamento semi-dúctil, com queda progressiva da força após o pico, mas sem ruptura abrupta. Esse desempenho está coerente com os padrões de fissuração observados, que indicaram falha concentrada na região de GFRP na região entre camadas de concreto.

Com a introdução de reforço de 2 mm, o conector S3-2 passou a apresentar um comportamento que varia entre semi-dúctil e dúctil, com redução gradual da força após o pico, sem tramos lineares bem definidos, mas com maior capacidade de deformação em comparação ao S3-0. Esse efeito se intensifica no modelo S3-4, que apresentou comportamento nitidamente dúctil, incluindo um patamar plástico aproximadamente linear após o pico de força. Esse trecho da curva se estende por um intervalo relativamente longo, seguido por uma queda também gradual, o que indica boa capacidade de redistribuição de esforços.

O conector S3-6 manteve o patamar plástico linear após o pico, embora menos prolongado. Entretanto, ao final dessa fase, observa-se uma queda abrupta da força, sinalizando um comportamento mais frágil após a deformação plástica inicial. No modelo S3-8, esse efeito é ainda mais pronunciado. Apesar da presença de um curto patamar plástico, a queda da força é bastante abrupta, o que evidencia a perda de ductilidade associada ao aumento excessivo da espessura do reforço.

Em síntese, a progressiva elevação da espessura do enrijecedor contribui para alterar o modo de ruptura dos conectores, inicialmente promovendo maior ductilidade, mas, a partir de certo ponto, favorecendo falhas mais bruscas e localizadas.

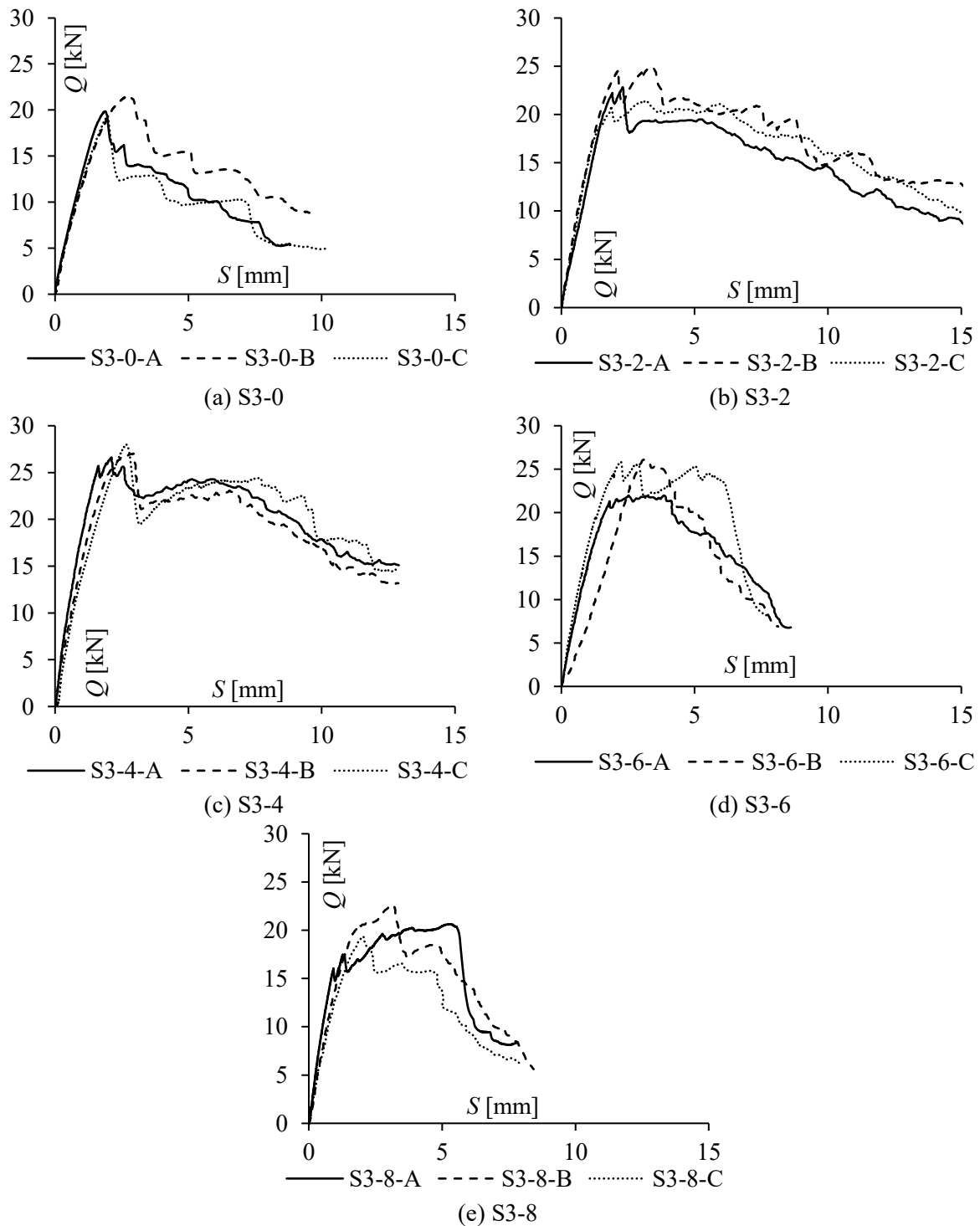


Figura 4.47 – Curvas força *versus* deslizamento relativo dos conectores da Série 3: (a) S3-0-*r*; (b) S3-2-*r*; (c) S3-4-*r*; (d) S3-6-*r*; e (e) S3-8-*r*.

4.4.2.2 Gráficos combinados

A Figura 4.48 apresenta o comportamento médio de carregamento *versus* deslizamento relativo dos conectores da Série 3, com os gráficos construídos a partir da média das réplicas de cada configuração. Para cada ponto de deslizamento, foi calculada a média da força correspondente, conforme descrito no item 3.5 do capítulo de processamento dos dados.

A figura foi dividida em dois gráficos: o primeiro (a) apresenta os modelos com reforços de 0 a 4 mm, enquanto o segundo (b) abrange os modelos com reforços de 4 a 8 mm.

Observa-se que, em ambos os gráficos, o conector com reforço de 4 mm se destacou com o melhor desempenho em termos de capacidade de carga e ductilidade da curva. O aumento progressivo do enrijecimento de 0 mm para 2 mm e de 2 mm para 4 mm resultou em ganhos significativos tanto na força máxima quanto na capacidade de deformação dos conectores.

Contudo, esse padrão se inverte a partir do reforço de 4 mm. Nota-se uma redução clara na carga máxima e na ductilidade ao se passar de 4 mm para 6 mm, e novamente de 6 mm para 8 mm, indicando que o aumento excessivo da espessura do enrijecedor compromete o desempenho do conector, possivelmente devido à concentração de tensões na região de transição entre o GFRP na região entre camadas de concreto e o concreto.

A rigidez inicial das curvas, por outro lado, manteve-se relativamente constante entre todas as configurações, sem variações significativas que pudessem ser atribuídas à espessura do reforço. Essa estabilidade indica que a rigidez no início do carregamento é pouco sensível às alterações geométricas promovidas pelos enrijecedores, ao contrário do comportamento no pós-pico, onde os efeitos se tornam mais evidentes.

De forma geral, os gráficos combinados reforçam que há um intervalo ideal de espessura de reforço, representado aqui pelo modelo com 4 mm, que maximiza simultaneamente a capacidade resistente e a ductilidade do conector, sem induzir mecanismos de falha prematuros.

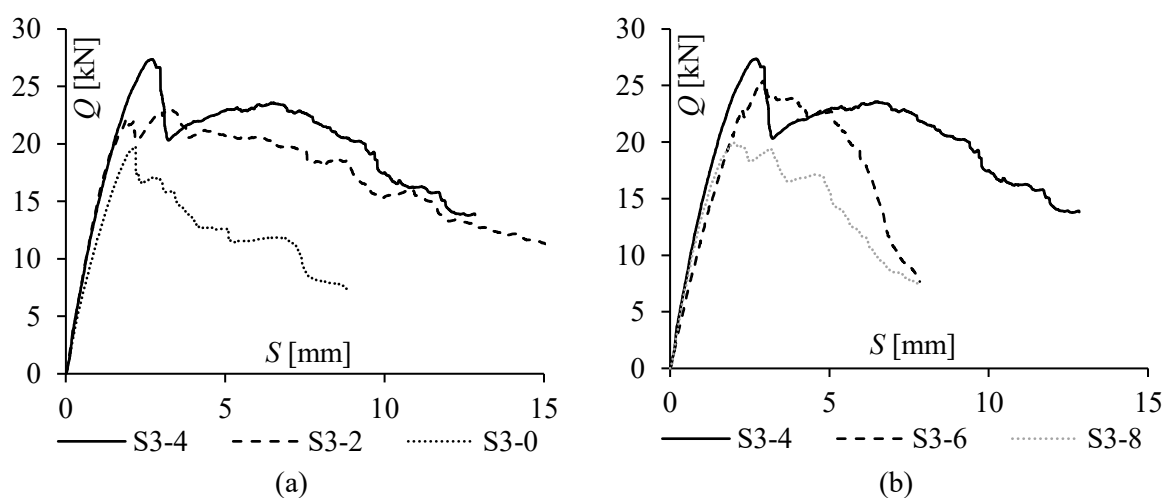


Figura 4.48 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 3: (a) S1-57- S_b ; (b) S1-40- S_b ; (c) S1-30- S_b ; (d) S1-CTL

4.4.3 Parâmetros mecânicos

A caracterização do comportamento mecânico dos conectores da Série 3 é aprofundada neste tópico por meio da análise de parâmetros extraídos das curvas força versus deslizamento relativo. São apresentados, entre outros, os resultados de capacidade última, deslocamento na capacidade última, rigidez inicial, energia absorvida e coeficientes de rigidez elástico e inelástico. Essa etapa complementa as análises anteriores, nas quais foram examinados os padrões de fissuração e os gráficos de força versus deslizamento, permitindo uma avaliação mais abrangente do efeito da espessura do enrijecedor sobre o desempenho estrutural dos conectores.

4.4.3.1 Capacidade última, deslocamento na capacidade última e rigidez inicial

A Tabela 4.21 apresenta os valores individuais, as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação dos parâmetros mecânicos extraídos das curvas força versus deslizamento dos conectores da Série 3. Essa análise permite avaliar o efeito da espessura do enrijecedor sobre o desempenho estrutural dos modelos testados.

Com relação à capacidade última ($Q_{lo,u}$), observa-se um crescimento contínuo de S3-0 (20,25 kN) para S3-2 (23,05 kN) e S3-4 (27,21 kN), indicando ganhos progressivos de resistência com o aumento da espessura do enrijecedor até 4 mm. A partir desse ponto, os valores voltam a cair: S3-6 apresentou média de 24,63 kN e S3-8 caiu para 20,84 kN, retornando praticamente ao patamar inicial de S3-0. Isso confirma que o reforço de 4 mm resultou na melhor performance em termos de resistência máxima.

Em relação ao deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$), o comportamento foi distinto: os conectores S3-2 (2,94 mm) e S3-4 (2,56 mm) apresentaram valores intermediários, enquanto o S3-0 e o S3-6 ficaram em patamares semelhantes e ligeiramente inferiores (2,20 mm e 2,62 mm, respectivamente). O modelo S3-8, por sua vez, apresentou deslocamento médio significativamente maior (3,47 mm), mas com alto coeficiente de variação (48%), o que indica grande variabilidade entre as réplicas e possível ocorrência de instabilidades no mecanismo de falha. Assim, embora S3-8 tenha alcançado o maior deslocamento no pico, isso não se traduziu necessariamente em melhor desempenho, já que ocorreu em conjunto com menor resistência e maior dispersão.

Quanto à rigidez inicial (K_f), os valores médios permaneceram relativamente próximos entre os modelos, variando entre 11,77 kN/mm (S3-0) e 18,32 kN/mm (S3-4). O modelo S3-4 apresentou a maior rigidez média, juntamente com bom controle de dispersão (c_v de 19,24%). O modelo S3-6 teve média de 12,75 kN/mm, com maior variabilidade (c_v de

28,56%), enquanto S3-8, apesar de uma média razoável (14,72 kN/mm), também apresentou alta dispersão.

Em síntese, os dados da Tabela 4.21 indicam que o modelo com reforço de 4 mm (S3-4) apresentou o desempenho mais equilibrado entre resistência, rigidez e deslocamento, ao passo que o modelo S3-8, apesar de permitir maior deformação no pico, teve desempenho inferior em termos de força máxima e maior instabilidade entre réplicas, o que o torna menos vantajoso estruturalmente.

Tabela 4.21 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 3: capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f).

Código	$Q_{lo,u}$				$S_{lo,u}$				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S3-0-A	19,86				1,88				12,71			
S3-0-B	21,54	20,25	1,15	5,68	2,74	2,20	0,47	21,52	10,97	11,77	0,88	7,45
S3-0-C	19,34				1,97				11,64			
S3-2-A	22,82				2,30				13,04			
S3-2-B	24,89	23,05	1,74	7,55	3,36	2,94	0,56	19,11	14,67	14,19	1,00	7,03
S3-2-C	21,43				3,15				14,85			
S3-4-A	26,61				2,11				18,32			
S3-4-B	27,02	27,21	0,71	2,60	2,92	2,56	0,41	16,13	14,53	15,15	2,91	19,24
S3-4-C	27,99				2,66				12,59			
S3-6-A	21,98				2,52				13,86			
S3-6-B	26,11	24,63	2,30	9,34	3,09	2,62	0,43	16,55	8,68	12,75	3,64	28,56
S3-6-C	25,80				2,24				15,70			
S3-8-A	20,63				5,28				18,05			
S3-8-A	22,59	20,84	1,66	7,97	3,11	3,47	1,66	48,00	13,61	14,72	2,93	19,92
S3-8-A	19,29				2,01				12,51			

A Figura 4.49 mostra a variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$) dos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor, comparando dois modelos de regressão: polinomial e linear. O modelo polinomial de segundo grau (Figura 4.49a) apresentou excelente aderência aos dados experimentais, com equação $y = -0,36x^2 + 2,98x + 19,79$ e $R^2 = 0,90$, refletindo de forma coerente o comportamento observado nos ensaios, ou seja, aumento da capacidade até o reforço de 4 mm e posterior queda. Em contrapartida, a regressão linear (Figura 4.49b), com equação $y = 0,14x + 22,64$ e $R^2 = 0,02$, revelou ausência de correlação significativa, indicando que o comportamento da capacidade última em função da espessura do reforço não pode ser descrito por uma relação linear simples. Dessa forma, o modelo polinomial se mostra mais adequado para representar a influência da espessura do enrijecedor sobre a resistência dos conectores.

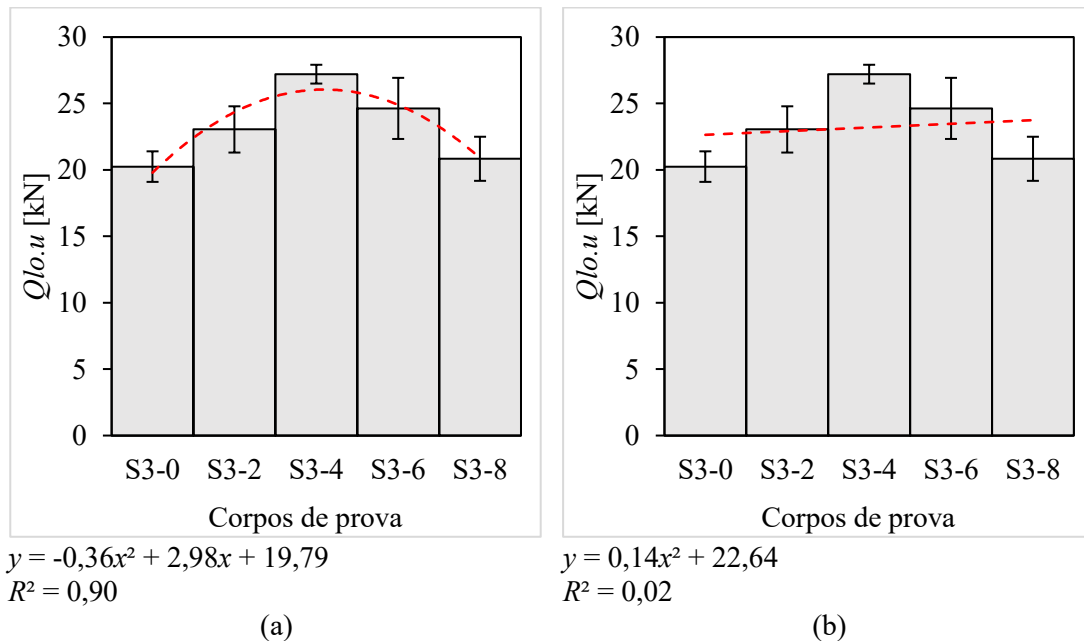


Figura 4.49 – Variação da capacidade última ($Q_{lo,u}$) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

Complementando a análise da Figura 4.49, a Figura 4.50 examina a variação do deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) em função da espessura do enrijecedor, utilizando os mesmos dois modelos de regressão. O modelo polinomial de segundo grau (Figura 4.50a), com equação $y = 0,05x^2 - 0,06x + 2,41$ e $R^2 = 0,58$, apresentou ajuste fraco, mas ligeiramente superior ao da regressão linear. Já o modelo linear (Figura 4.50b), com equação $y = 0,22x + 2,09$ e $R^2 = 0,54$, também apresentou correlação fraca, demonstrando que, apesar de uma leve tendência de aumento do deslocamento com a espessura, os dados são dispersos e não seguem um padrão bem definido. Assim, diferentemente do que se observou para a capacidade última,

a relação entre $S_{lo,u}$ e espessura do enrijecedor é mais incerta e não pode ser representada com precisão por nenhuma das abordagens testadas.

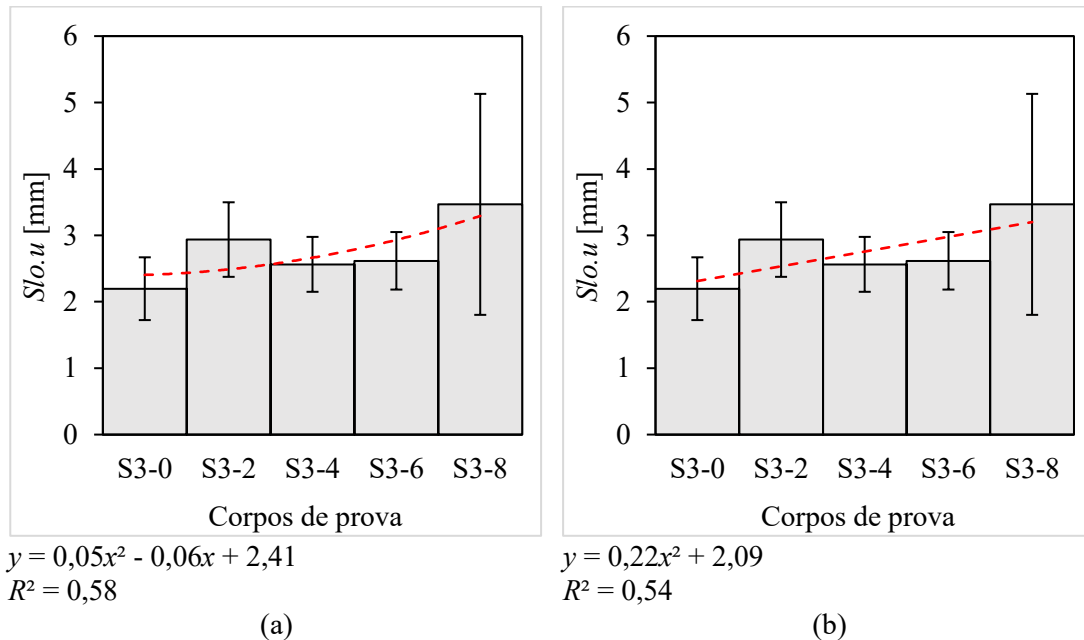


Figura 4.50 – Variação do deslocamento na capacidade última capacidade ($S_{lo,u}$) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

Dando continuidade à análise dos efeitos da espessura do enrijecedor sobre os parâmetros mecânicos, a Figura 4.51 apresenta a variação da rigidez inicial (K_f) em função dessa espessura, com modelos de regressão polinomial e linear. O ajuste polinomial de segundo grau (Figura 4.51a), com equação $y = -0,30x^2 + 2,26x + 10,26$ e $R^2 = 0,41$, indicou uma correlação fraca, sugerindo uma tendência de aumento da rigidez até determinado ponto, seguida de uma leve redução. O modelo linear (Figura 4.51b), com equação $y = 0,45x + 12,38$ e $R^2 = 0,25$, apresentou desempenho ainda mais limitado, sem representar adequadamente as variações observadas nos dados. Assim, diferentemente da capacidade última, cuja tendência foi bem representada, e de forma semelhante ao que ocorreu com o deslocamento, a rigidez inicial também não apresentou uma relação claramente definida com a espessura do reforço, sendo influenciada por outros fatores além da geometria local do conector.

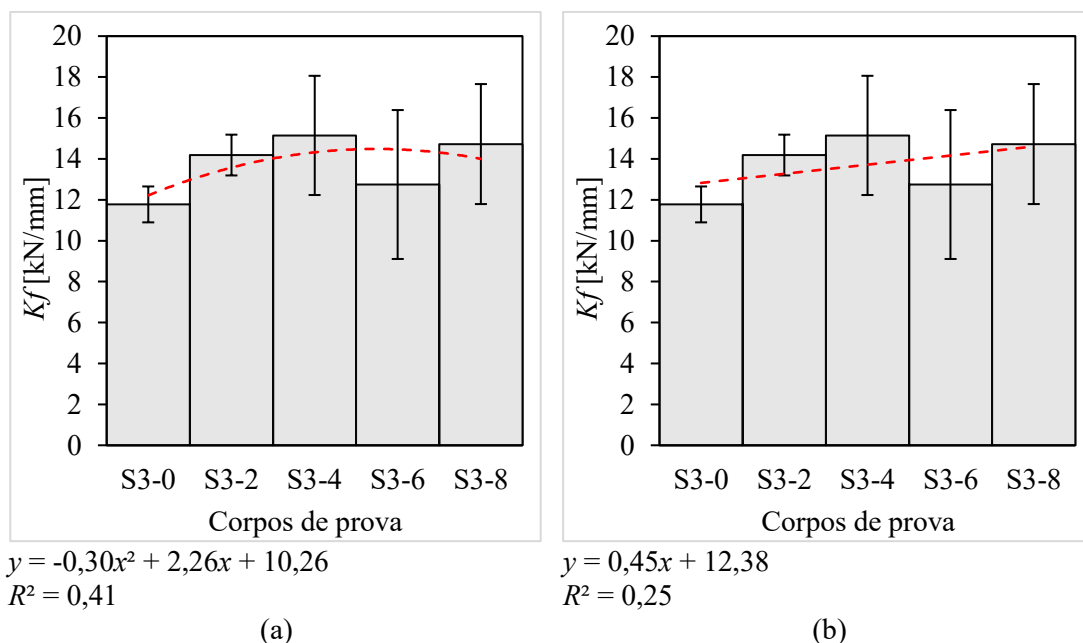


Figura 4.51 – Variação da rigidez inicial (K_f) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

4.4.3.2 Energia absoluta absorvida e energia relativa absorvida

A Tabela 4.22 apresenta os valores individuais e estatísticos da energia absoluta absorvida (W_{abs}) e da energia relativa absorvida (W_{rel}) para os conectores da Série 3, permitindo avaliar a capacidade de dissipação de energia dos modelos em termos absolutos e em relação à força máxima.

Observa-se que os conectores S3-2 e S3-4 apresentaram os maiores valores médios de energia absorvida: 246,54 kN·mm e 253,41 kN·mm, respectivamente, com coeficientes de variação baixos (8,38% e 3,36%). Esses resultados indicam desempenho consistente e eficiente na dissipação de energia, tanto em termos absolutos quanto relativos. A energia relativa absorvida, que considera a relação entre energia e força máxima, reforça esse comportamento: os modelos S3-2 (10,72 kN·mm/kN) e S3-4 (9,32 kN·mm/kN) foram os que mais se destacaram.

Por outro lado, os modelos com reforços de 6 mm (S3-6) e 8 mm (S3-8) apresentaram reduções expressivas na energia absorvida. O S3-6 teve valor médio de 136,50 kN·mm, e o S3-8, de 113,23 kN·mm, ambos com coeficientes de variação mais elevados, sugerindo maior variabilidade e desempenho inferior. Em termos relativos, os valores também foram mais baixos, indicando perda de eficiência na capacidade de dissipação de energia conforme a espessura do enrijecedor ultrapassa 4 mm.

O conector S3-0, sem reforço, apresentou valores médios bem inferiores aos dos modelos intermediários: 107,85 kN·mm de energia absoluta e 5,31 kN·mm/kN de energia

relativa, evidenciando comportamento menos eficiente, embora mais consistente que os modelos com reforço espesso.

Esses resultados reforçam a conclusão de que os modelos com reforço de 2 mm a 4 mm representam a faixa de melhor desempenho estrutural da Série 3, tanto em termos de resistência e deformabilidade quanto na capacidade de dissipação de energia, atributo importante para aplicações em que o comportamento dúctil e a resistência progressiva à ruptura são desejáveis.

Tabela 4.22 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 3: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN·mm]	$\bar{x}$ [kN·mm]	s [kN·mm]	c_v [%]	x_n [kN·mm/kN]	$\bar{x}$ [kN·mm/kN]	s [kN·mm/kN]	c_v [%]
S3-0-A	96,46				4,86			
S3-0-B	128,81	107,85	18,17	16,85	5,98	5,31	0,59	11,20
S3-0-C	98,28				5,08			
S3-2-A	223,57				9,80			
S3-2-B	263,61	246,54	20,66	8,38	10,59	10,72	1,00	9,30
S3-2-C	252,43				11,78			
S3-4-A	259,33				9,75			
S3-4-B	243,65	253,41	8,52	3,36	9,02	9,32	0,38	4,08
S3-4-C	257,25				9,19			
S3-6-A	135,63				6,17			
S3-6-B	122,68	136,50	14,28	10,46	4,70	5,58	0,78	13,92
S3-6-C	151,20				5,86			
S3-8-A	118,96				5,77			
S3-8-A	123,85	113,23	14,37	12,70	5,48	5,42	0,38	6,93
S3-8-A	96,87				5,02			

Complementando os dados apresentados na Tabela 4.22, a Figura 4.52 mostra a variação da energia absoluta absorvida (W_{abs}) em função da espessura do enrijecedor, utilizando modelos de regressão polinomial e linear. O modelo polinomial de segundo grau (Figura 4.52a), com equação $y = -31,98x^2 + 181,95x - 22,56$ e $R^2 = 0,73$, apresentou ajuste bom, indicando um comportamento parabólico típico: aumento da energia dissipada até o reforço de 4 mm e posterior queda, em concordância com os valores médios discutidos anteriormente. Já a regressão linear (Figura 4.52b), com equação $y = -9,93x + 201,29$ e $R^2 = 0,05$, não apresentou correlação significativa, confirmando que o comportamento não pode ser descrito por uma tendência linear. Os dados reforçam a conclusão de que a faixa ideal de espessura para maximizar a dissipação de energia situa-se entre 2 mm e 4 mm.

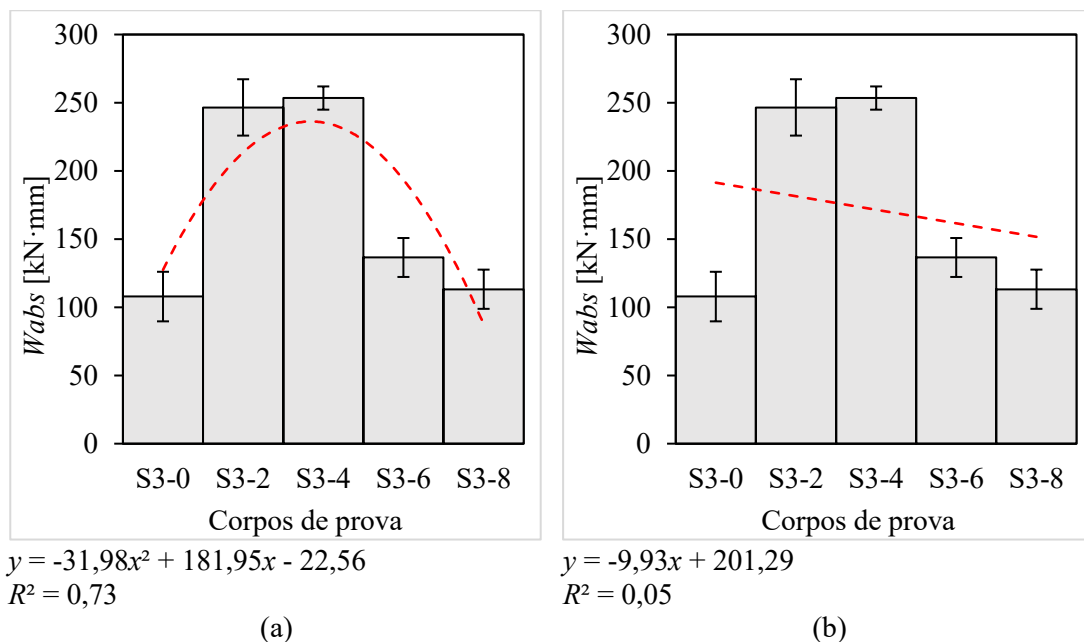


Figura 4.52 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

Dando sequência à análise da energia dissipada, a Figura 4.53 apresenta a variação da energia relativa absorvida (W_{rel}) em função da espessura do enrijecedor, com modelos de regressão polinomial e linear. O modelo polinomial de segundo grau (Figura 4.53a), com equação $y = -0,96x^2 + 5,28x + 2,01$ e $R^2 = 0,59$, apresentou ajuste moderado, indicando uma tendência de aumento da eficiência energética até cerca de 2 a 4 mm de reforço, seguido de declínio. Já o modelo linear (Figura 4.53b), com equação $y = -0,49x + 8,74$ e $R^2 = 0,09$, demonstrou fraca correlação, reforçando que a relação não é linear. Esses resultados estão em consonância com os valores da Tabela 4.22, reforçando que a faixa intermediária de espessura

proporciona melhor desempenho tanto em termos absolutos quanto relativos de dissipação de energia.

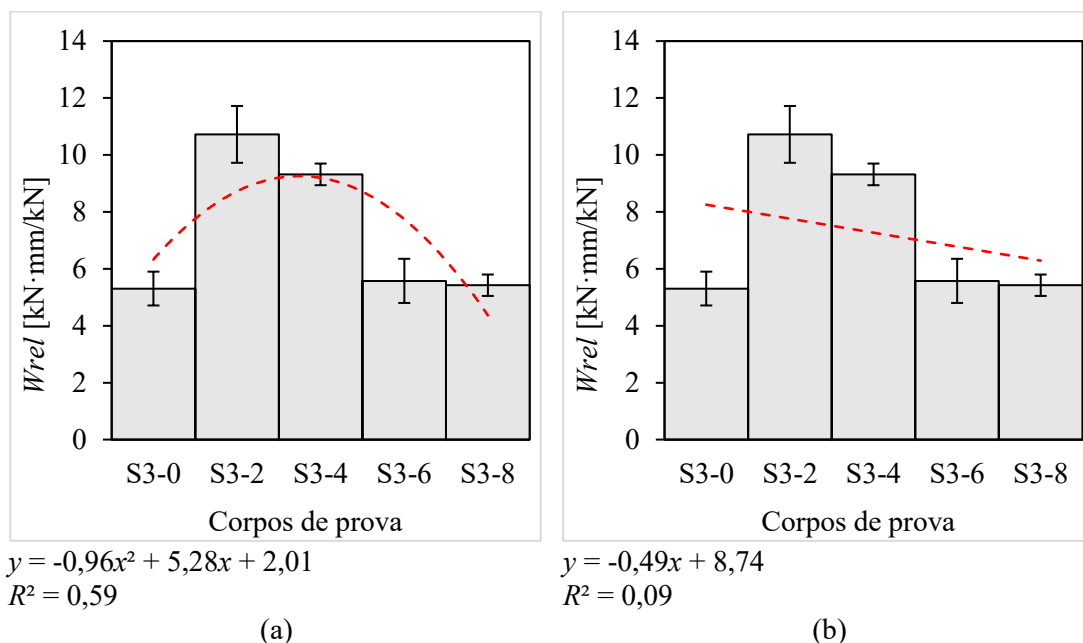


Figura 4.53 – Variação da energia absorvida (W_{abs}) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

4.4.4 Avaliação da ductilidade

A Tabela 4.23 apresenta a classificação da ductilidade dos conectores da Série 3 com base nos critérios estabelecidos pela norma prEN 1994-1-1, que considera o deslizamento na resistência característica (δ_{ek}) e na força máxima (δ_{uk}), além da rigidez inicial (K_f). A partir desses parâmetros, os conectores foram enquadrados nas categorias D1, D2 ou D3, conforme a relação entre os deslocamentos e a capacidade de dissipação de energia antes da ruptura.

Observa-se que apenas o conector S3-2 atingiu a classificação D2, sendo os demais enquadrados na categoria D1, o que indica comportamento de ductilidade limitada. Essa classificação intermediária do S3-2 está associada ao seu elevado deslocamento último ($\delta_{uk} = 6,23$ mm), bastante superior aos demais conectores. Esse desempenho sugere que a espessura de 2 mm pode ter contribuído para um melhor equilíbrio entre resistência e deformabilidade, favorecendo um comportamento mais dúctil. Por outro lado, conectores como o S3-4 e o S3-6, apesar de apresentarem alta resistência ou maior δ_{ek} , não atingiram patamares de deslocamento suficientes após a resistência característica para avançar na classificação de ductilidade. Já o S3-8, com deslocamento limitado e maior rigidez, também permaneceu na categoria D1.

Tabela 4.23 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 3 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).

Identificação	P_e [kN]	P_{Rk} [kN]	δ_{ek} [mm]	δ_{uk} [mm]	K_f [kN/mm]	Categoria de ductilidade
S3-0	19,75	17,78	1,52	2,17	11,68	D1
S3-2	23,04	20,74	1,36	6,23	15,20	D2
S3-4	27,35	24,62	1,75	2,69	14,07	D1
S3-6	25,41	22,87	2,05	2,92	11,15	D1
S3-8	19,93	17,94	1,29	2,01	13,88	D1

Dando continuidade à análise de ductilidade, a Figura 4.54 apresenta as curvas modeladas de força versus deslizamento para os conectores da Série 3, utilizadas na classificação conforme a norma prEN 1994-1-1. Embora apenas o modelo S3-2 tenha sido classificado como D2, observa-se que os conectores S3-4 e S3-6 apresentaram valores de força mais elevados no regime inelástico para um mesmo nível de deslizamento, quando comparados ao S3-2. Isso indica que, mesmo sem atingirem os critérios normativos exigidos para categorias superiores de ductilidade, esses modelos mostraram desempenho mecânico relevante no trecho após o limite elástico.

As curvas dos conectores S3-0 e S3-8, por outro lado, situaram-se abaixo da do S3-2 nesse mesmo regime, o que sugere que a ausência de reforço ou o uso de enrijecedores excessivamente espessos pode comprometer a capacidade resistente após o início da fissuração. Já no regime elástico, todas as curvas apresentaram inclinações iniciais semelhantes, refletindo rigidez inicial aproximadamente constante entre os diferentes modelos. Dessa forma, as principais distinções de comportamento entre os conectores ficaram concentradas no trecho inelástico da resposta estrutural.

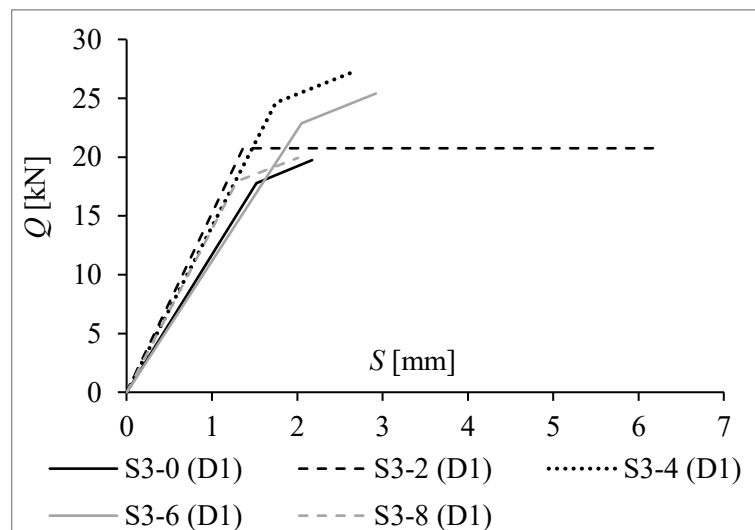


Figura 4.54 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 3:
(a) S3-0; (b) S3-2; (c) S3-4; (d) S3-6; e (e) S3-8.

4.5 Série 4: avaliação do efeito do número e do diâmetro dos furos na região de ancoragem em concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

Este tópico apresenta os resultados dos ensaios realizados na Série 4, cuja principal particularidade em relação às séries anteriores foi a adoção de diferentes combinações de diâmetros e quantidades de furos nos conectores. Foram utilizados diâmetros de 12,70 mm, 15,88 mm e 19,05 mm, com variações de 1, 2 ou 3 furos por região de ancoragem do GFRP. Essas modificações foram implementadas com o objetivo de avaliar o efeito direto dessas variáveis no comportamento mecânico dos conectores, especialmente em termos de resistência, rigidez e ductilidade. Apesar das mudanças introduzidas, manteve-se constante o espaçamento relativo entre os furos e entre os furos e a borda interna dos conectores, de modo a preservar a coerência geométrica entre os diferentes modelos e permitir comparações mais controladas dentro da própria Série 4. A nomenclatura adotada nesta série segue o padrão “S4- D_h - n_h ”, sendo indicada, respectivamente, a série, o diâmetro dos furos em milímetros, a quantidade de furos e a réplica do ensaio.

Dessa forma, os resultados obtidos na Série 4 são válidos apenas para as combinações específicas de diâmetro e quantidade de furos consideradas, nas quais se manteve constante a relação geométrica entre perfurações e bordas internas do conector. Extrapolações para conectores com arranjos distintos de furos, diferentes espaçamentos relativos ou outras condições não contempladas nos ensaios devem ser feitas com cautela e carecem de verificação experimental adicional.

4.5.1 Padrões de fissuração

A análise dos padrões de fissuração observados nos conectores da Série 4 permite compreender como a variação no número e no diâmetro dos furos influencia a propagação das fissuras nos ensaios de cisalhamento duplo. A diversidade geométrica das configurações testadas gerou respostas distintas em termos de direção, localização e extensão das fissuras. Como nas séries anteriores, as fissuras se concentram nas regiões de ancoragem do conector.

Na Figura 4.55, observa-se que os conectores do grupo S4-19-1, com apenas um furo e maior diâmetro (19,05 mm), apresentaram fissuras inclinadas partindo diretamente do furo em direção à borda interna do conector, o que indica a concentração de tensões ao redor do único ponto de ancoragem. Já nos conectores S4-19-2, com dois furos do mesmo diâmetro, além de fissuras inclinadas semelhantes às do grupo anterior, surgiram também fissuras verticais que interligam os furos ou se desenvolvem paralelamente à borda interna do conector, sugerindo uma redistribuição mais complexa das tensões entre as zonas de ancoragem. Em comparação, o conector S2-FRP da Série 2, que pode ser considerado funcionalmente equivalente a um modelo hipotético S4-19-3, apresentou fissuras inclinadas passando pelos furos e algumas fissuras verticais menos pronunciadas, comportamento intermediário entre os observados em S4-19-1 e S4-19-2.

Nos conectores S4-16-3, com três furos de 15,88 mm, predominam fissuras verticais interligando os furos, especialmente nas réplicas A e C. Na réplica B, identificou-se uma fissura adicional passando junto à borda interna, enquanto a réplica A também apresentou algumas fissuras inclinadas, o que indica uma possível combinação de mecanismos resistentes. Por fim, nos conectores S4-13-3, com três furos de menor diâmetro (12,70 mm), as fissuras continuaram a se desenvolver verticalmente, conectando os furos entre si, com algumas se estendendo até regiões próximas à borda interna do conector.

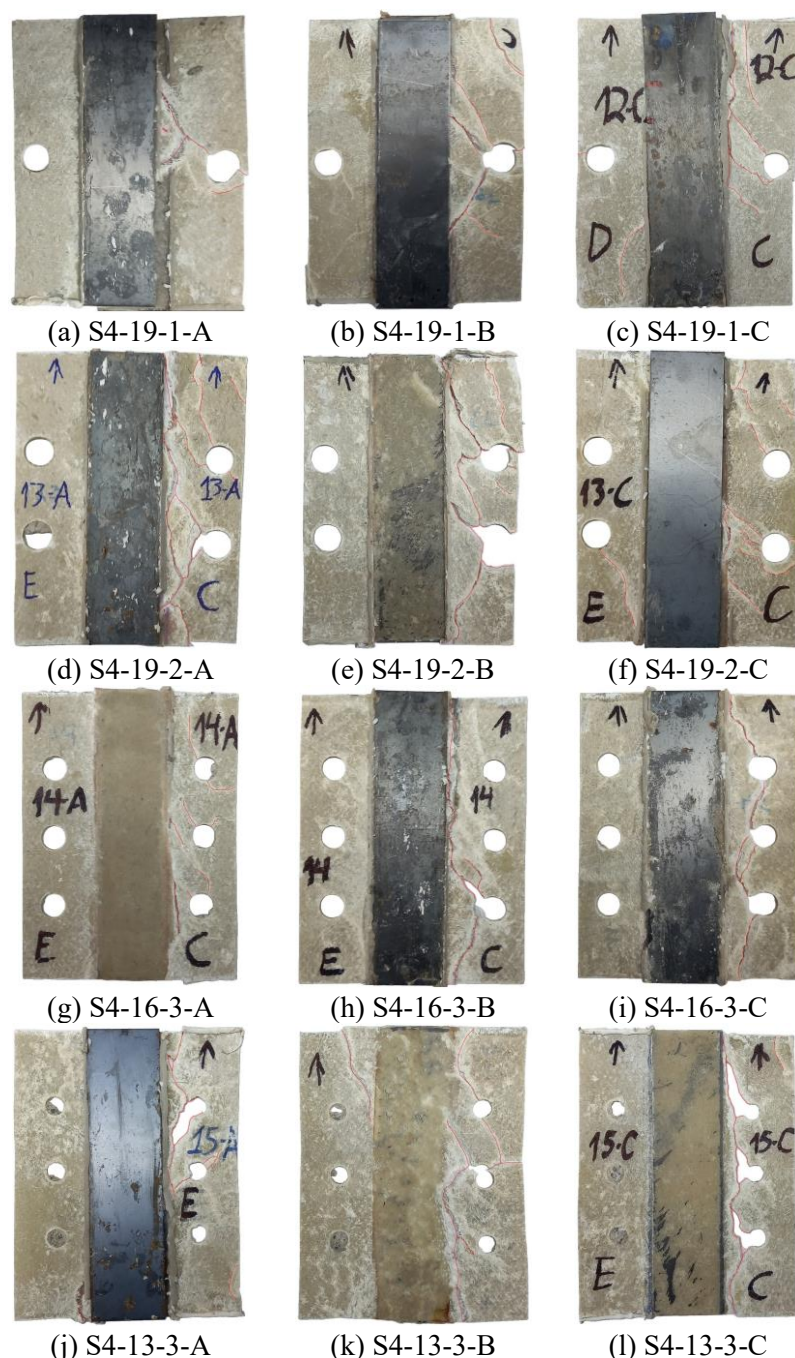


Figura 4.55 – Padrões de fissuração observados nos conectores da Série 4: (a) S4-19-1-A; (b) S4-19-1-B; (c) S4-19-1-C; (d) S4-19-2-A; (e) S4-19-2-B; (f) S4-19-2-C; (g) S4-16-3-A; (h) S4-16-3-B; (i) S4-16-3-C; (j) S4-13-3-A; (k) S4-13-3-B; e (l) S4-13-3-C.

A Tabela 4.24 complementa a análise dos padrões de fissuração discutidos anteriormente ao quantificar a extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 4. Os valores reforçam a percepção de que o número e o diâmetro dos furos influenciam significativamente o comportamento à fissuração dos conectores.

Os conectores S4-19-1, com apenas um furo de grande diâmetro, apresentaram a maior variabilidade nos resultados ($c_v = 51,38\%$), com extensão média de fissuras mais

dispersa, refletindo a instabilidade na propagação das fissuras quando há apenas um ponto de descontinuidade. A introdução de um segundo furo, no caso dos S4-19-2, resultou em fissuras mais longas ($x = 39,57$ cm) e menos dispersas ($c_v = 14,92\%$), o que sugere que a duplicação dos furos contribuiu para um comportamento mais previsível.

Ainda que não pertençam oficialmente à Série 4, os valores dos conectores S4-19-3 foram incluídos para efeito de comparação, com uma extensão média de 56,27 cm e coeficiente de variação moderado (20,47%). Essa configuração apresentou as maiores fissuras médias da tabela, o que se alinha ao padrão visualmente observado no conector S2-FRP, sugerindo que o aumento no número de furos facilita a propagação mais ampla das fissuras ao longo do conector.

Nos conectores com furos menores, S4-16-3 e S4-13-3, as fissuras apresentaram extensões médias menores (20,53 cm e 32,46 cm, respectivamente), com dispersão moderada, o que pode ser atribuído ao menor diâmetro dos furos, que reduz a área de descontinuidade e restringe o alongamento das fissuras.

Tabela 4.24 – Extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 4: valores individuais, médias, desvios-padrão e coeficientes de variação por configuração de conector.

Código	x_n [cmN]	$\bar{x}$ [cm]	s [cm]	c_v [%]
S4-19-1-A	11,65			
S4-19-1-B	23,13	23,54	12,09	51,38
S4-19-1-C	35,83			
S4-19-2-A	45,76			
S4-19-2-B	38,93	39,57	5,90	14,92
S4-19-2-C	34,01			
S4-19-3-A ¹	55,38			
S4-19-3-B ¹	68,21	56,27	11,52	20,47
S4-19-3-C ¹	45,22			
S4-16-3-A	16,55			
S4-16-3-B	24,40	20,53	3,93	19,13
S4-16-3-C	20,65			
S4-13-3-A	27,87			
S4-13-3-B	36,04	32,46	4,18	12,86
S4-13-3-C	33,47			

A Figura 4.56 sintetiza a relação entre a extensão das fissuras (l_f) e três variáveis geométricas distintas dos conectores da Série 4: quantidade de furos (a), diâmetro dos furos (b) e área de perfuração (c). A subfigura (a) revela uma forte correlação linear entre o número de furos e a extensão das fissuras ($R^2 = 1,00$), o que indica que, para a geometria adotada, o

aumento na quantidade de furos foi o fator mais determinante para a propagação das fissuras ao longo do conector. A subfigura (b), por outro lado, mostra uma correlação fraca ($R^2 = 0,43$) entre o diâmetro dos furos e a extensão das fissuras, sugerindo que o diâmetro isoladamente não explica com clareza o comportamento observado. Já a subfigura (c), que relaciona a área total de perfuração (A_h) com a extensão das fissuras, apresenta uma correlação intermediária ($R^2 = 0,49$), indicando que, embora a área perfurada agregue os efeitos de quantidade e diâmetro, a influência da quantidade de furos parece prevalecer como principal parâmetro de controle. Esses resultados estão alinhados com a análise anterior da Tabela 4.24, reforçando que a presença de múltiplos furos proporciona trajetórias preferenciais de fissuração e facilita a dissipação das tensões internas.

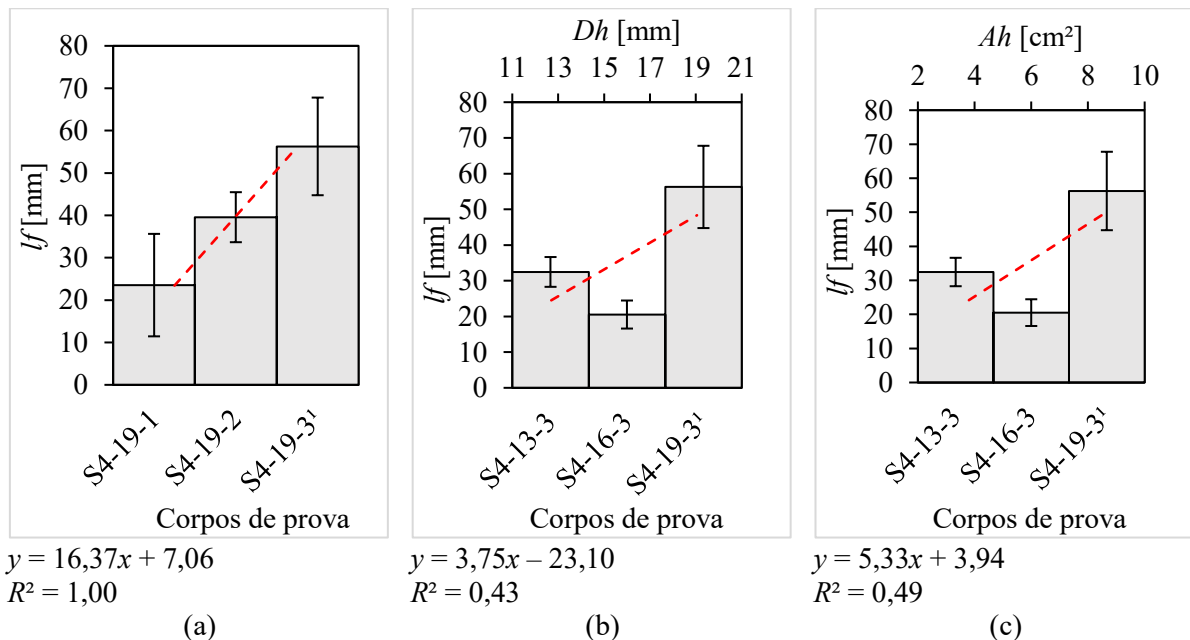


Figura 4.56 – Variação da extensão das fissuras (l_f) nos conectores da Série 1 em função da: (a) quantidade de furos (n_h); (b) diâmetro dos furos (D_h); e (c) área de perfuração (A_h).

4.5.2 Carregamento versus deslizamento relativo

O tópico 4.5.2 apresenta as curvas força versus deslizamento relativo dos conectores da Série 4. Essas curvas permitem comparar o desempenho das diferentes configurações em termos de rigidez e deformação, considerando as variações no número e no diâmetro dos furos. A análise busca identificar como essas variáveis influenciam o comportamento global dos conectores ao longo do carregamento.

4.5.2.1 *Gráficos individuais*

Nesta seção, são apresentados os gráficos individuais das curvas força versus deslizamento relativo para cada modelo de conector da Série 4, permitindo observar o comportamento típico de cada réplica e verificar a consistência entre os ensaios. A análise gráfica contribui para caracterizar a resposta mecânica dos conectores, especialmente em relação à ductilidade, à presença de patamares plásticos e à forma como ocorre a perda de resistência após o pico de força.

A Figura 4.57a (S4-19-1) indica um comportamento dúctil, com pequena queda de força após o pico, seguida por um patamar plástico aproximadamente linear e, posteriormente, uma queda discreta e gradual. A exceção se dá na réplica B, que apresentou um comportamento mais dúctil, com um patamar plástico crescente e uma queda mais acentuada após essa fase. Na Figura 4.57b (S4-19-2), observa-se um comportamento igualmente dúctil, com bom alinhamento entre as réplicas. Todas apresentaram patamar plástico linear e queda final bem discreta e gradual, embora a réplica C tenha evidenciado uma perda de força mais abrupta.

A Figura 4.57c (S4-16-3) também revela um comportamento dúctil, com patamar plástico relativamente linear, mas levemente decrescente. Não há uma queda de força claramente marcada, o que sugere uma transição suave entre os regimes plástico e residual. Já a Figura 4.57d (S4-13-3) apresenta um comportamento dúctil com patamar plástico mais curto que os demais. Após o fim do regime plástico, verifica-se uma queda de força mais evidente, embora ainda gradual, caracterizando uma transição mais abrupta entre os regimes plástico e residual. De modo geral, os gráficos demonstram boa concordância entre as réplicas, com pequenas variações esperadas entre os ensaios.

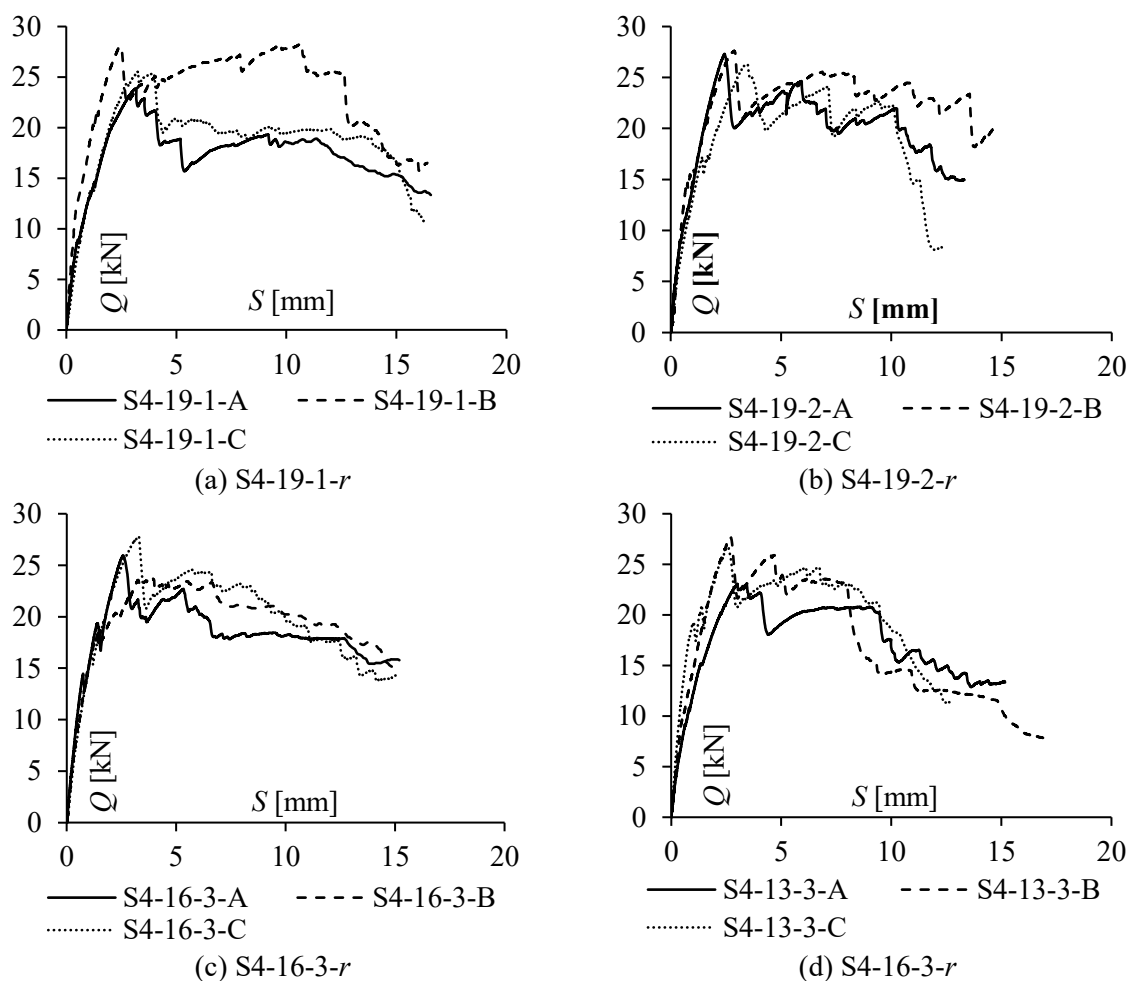


Figura 4.57 – Curvas força versus deslizamento relativo dos conectores da Série 4: (a) S4-19-1; (b) S4-19-2; (c) S4-16-3; e (d) S4-13-3.

4.5.2.2 Gráficos combinados

Os gráficos combinados apresentados na Figura 4.58 foram construídos a partir da média das curvas força versus deslizamento relativo de cada modelo, conforme metodologia descrita em "3.5 Processamento dos dados". O objetivo é facilitar a comparação direta entre diferentes conectores da Série 4. Para isso, foi incluído também o conector S4-19-3, que corresponde ao modelo S2-FRP da Série 2, permitindo analisar o efeito comparativo da variação no número e no diâmetro dos furos frente a um conector de referência.

Na Figura 4.58a, observa-se que os três modelos com diâmetro de 19,05 mm (S4-19-1, S4-19-2 e S4-19-3) apresentaram rigidez inicial bastante semelhante. No entanto, a curva do S4-19-3 posiciona-se acima das demais tanto ao longo de parte do regime elástico quanto em parte do patamar plástico, indicando que esse modelo suportou forças mais elevadas para os mesmos níveis de deslizamento. O patamar plástico e o trecho residual do S4-19-2 foram visualmente bastante semelhantes aos do S4-19-3. Já o S4-19-1 apresentou um patamar plástico

ligeiramente mais prolongado, com a queda de força ocorrendo mais adiante, ainda que com inclinação parecida à dos demais.

Na Figura 4.58b, novamente o S4-19-3 se destaca com a curva superior às demais ao longo de praticamente toda a extensão. As curvas dos modelos S4-13-3 e S4-16-3 se mostraram bastante próximas entre si até o final do regime plástico. Após esse ponto, o S4-13-3 apresentou uma queda um pouco mais acentuada, mas ainda gradual, enquanto o S4-19-3 exibiu uma queda consideravelmente mais brusca.

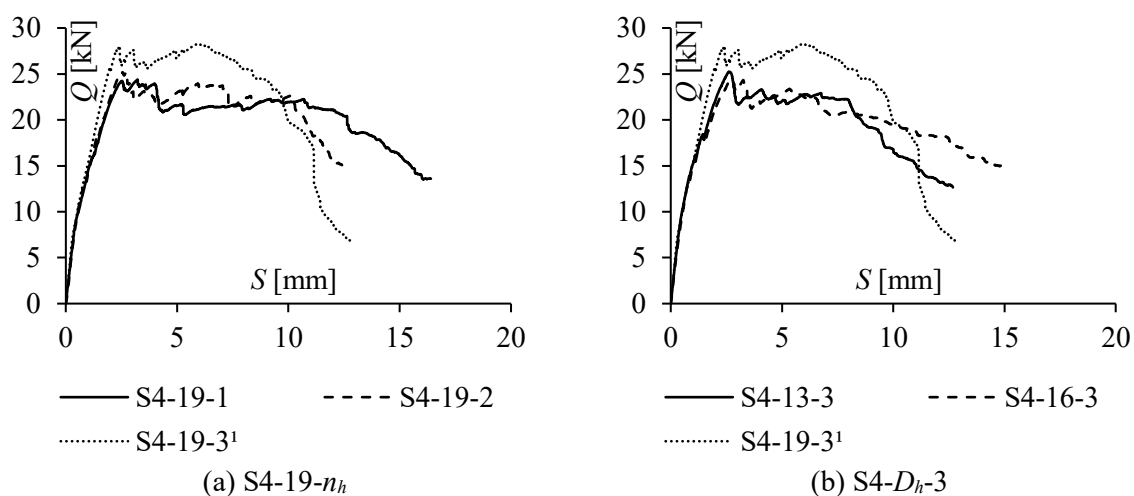


Figura 4.58 – Comportamento carregamento *versus* deslizamento relativo da Série 4: (a) S4-19-1, S4-19-2 e S4-19-3; (b) S4-13-3, S4-16-3 e S4-19-3.

Em síntese, os resultados da Série 4 indicam que as diferenças no comportamento força *versus* deslizamento relativo entre os diferentes conectores testados foram relativamente sutis. A redução no número de furo, como observado nos modelos com um ou dois furos, favoreceu a extensão do patamar plástico, embora essa configuração tenha resultado em menor capacidade de força. Por outro lado, o conector com três furos (S4-19-3), apesar de apresentar maior resistência, teve sua força reduzida mais precocemente, efeito associado ao maior grau de fissuração induzido pela presença de múltiplos furos.

Quanto à variação no diâmetro dos furos, verificou-se que os conectores com diâmetros menores (13 mm e 16 mm) apresentaram comportamentos bastante semelhantes, tanto em termos de formato das curvas quanto de desempenho geral. Já o modelo com furos de 19 mm atingiu maior capacidade de força, mas apresentou uma queda mais abrupta após o patamar plástico, provavelmente em decorrência do maior número de fissuras geradas, que comprometeram a integridade do sistema após o regime de deformação plástica.

4.5.3 Parâmetros mecânicos

O tópico 4.5.3 apresenta os principais parâmetros mecânicos extraídos dos ensaios da Série 4, com base nas curvas força versus deslizamento relativo. Foram analisados diversos indicadores, como a força na capacidade última ($Q_{lo,u}$), o deslizamento correspondente ($S_{lo,u}$), o coeficiente de rigidez inicial (K_f), a energia absorvida (absoluta e relativa), o coeficiente de rigidez elástico (K_e), entre outros. Esses parâmetros permitem avaliar de forma o desempenho mecânico dos conectores testados, possibilitando comparações entre as diferentes configurações adotadas e identificando os efeitos provocados pelas variações no número e no diâmetro dos furos.

4.5.3.1 Capacidade última, deslocamento na capacidade última e rigidez inicial

A Tabela 4.25 apresenta os resultados individuais e estatísticos de força na capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslizamento correspondente ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f) dos conectores da Série 4. Entre os destaques, o conector S4-19-3, proveniente da Série 2 e equivalente ao modelo S2-GFRP, obteve o maior valor médio de força (30,31 kN) e a maior rigidez inicial (14,11 kN/mm), mantendo também um deslizamento moderado na força máxima (2,77 mm). Esse conector, com três furos de 19 mm, apresentou desempenho superior aos conectores S4-19-1 ($Q_{lo,u} = 25,79$ kN) e S4-19-2 ($Q_{lo,u} = 27,04$ kN), que possuem um e dois furos, respectivamente. Isso sugere que o aumento da área de perfuração pode estar associado a ganhos de resistência até certo ponto

Em contrapartida, o conector S4- C_{TL} , também da Série 2 e correspondente ao modelo sem furos, registrou menor capacidade de força (26,14 kN), mas com excelente regularidade entre réplicas ($c_v = 4,03\%$) e alta rigidez inicial (13,18 kN/mm), desempenho que destaca a estabilidade proporcionada pela ausência de perfurações. Já entre os modelos da Série 4, os conectores com furos de menor diâmetro (13 mm e 16 mm), S4-13-3 e S4-16-3, apresentaram comportamentos semelhantes entre si, com capacidade de força ao redor de 25,8 kN e rigidez inicial variando de 13,54 kN/mm (S4-16-3) a 14,60 kN/mm (S4-13-3), embora este último tenha mostrado maior dispersão nos resultados ($c_v = 35,34\%$).

Os valores de deslizamento na força máxima ($S_{lo,u}$) também foram relativamente próximos entre todas as configurações, variando de 2,77 mm (S2-19-3) a 3,26 mm (S4-16-3), o que indica que as diferentes geometrias não resultaram em variações significativas no nível de deformação associado à capacidade máxima de força.

Tabela 4.25 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 4: capacidade última ($Q_{lo,u}$), deslocamento na capacidade última ($S_{lo,u}$) e rigidez inicial (K_f).

Código	$Q_{lo,u}$				$S_{lo,u}$				K_f			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S4-CTL-A ¹	27,24				3,02				13,80			
S4-CTL-B ¹	26,04	26,14	1,05	4,03	2,49	2,84	0,31	10,76	12,49	13,18	0,66	4,99
S4-CTL-C ¹	25,14				3,02				13,25			
S4-19-1-A	23,87				3,16				10,59			
S4-19-1-B	27,96	25,79	2,06	7,98	2,41	2,94	0,46	15,78	16,76	12,71	3,51	27,63
S4-19-1-C	25,53				3,26				10,77			
S4-19-2-A	27,30				2,43				13,62			
S4-19-2-B	27,59	27,04	0,71	2,63	2,86	2,92	0,53	18,06	13,32	12,26	2,10	17,14
S4-19-2-C	26,24				3,48				9,84			
S4-19-3-A ²	30,45				2,26				16,24			
S4-19-3-B ²	28,05	30,31	2,19	7,24	2,83	2,77	0,48	17,43	13,81	14,11	2,00	14,19
S4-19-3-C ²	32,43				3,22				12,27			
S4-13-3-A	23,09				3,43				10,28			
S4-13-3-B	27,69	25,81	2,41	9,35	2,69	2,89	0,47	16,36	13,20	14,60	5,16	35,34
S4-13-3-C	26,66				2,55				20,31			
S4-16-3-A	25,95				2,57				14,50			
S4-16-3-B	23,85	25,87	1,98	7,64	3,93	3,26	0,68	20,88	14,40	13,54	1,57	11,60
S4-16-3-C	27,80				3,27				11,73			
Obs. 1: conector proveniente da Série 2, correspondente à configuração sem furos (S2-CTL).												
Obs. 2: conector proveniente da Série 2, identificado naquela série como S2-FRP.												

Dando continuidade à análise apresentada na Tabela 4.25, a Figura 4.59 ilustra a variação dos principais parâmetros mecânicos, capacidade última (Figura 4.59a), deslizamento na capacidade última (Figura 4.59b) e rigidez inicial (Figura 4.59c), em função da quantidade de furos nos conectores da Série 4. Os gráficos de barras representam os valores médios de cada parâmetro, enquanto as barras de erro indicam os respectivos desvios-padrão, permitindo uma avaliação visual da dispersão dos dados.

No caso da Figura 4.59a, observa-se que a dispersão dos dados foi baixa, conforme evidenciado pelas barras de erro reduzidas associadas a cada ponto, que representam os desvios-padrão calculados. Esse aspecto, também verificado nos valores da Tabela 4.25, reforça a confiabilidade da tendência observada, expressa pela equação $y = 2,26x + 23,19$, com $R^2 = 0,94$. Além disso, esse comportamento é coerente do ponto de vista estrutural: ao se aumentar a quantidade de furos, aumenta-se também a área disponível para ancoragem do GFRP no concreto, o que tende a melhorar o desempenho resistente do conector.

Já na Figura 4.59b, referente ao deslizamento na força máxima ($S_{l.o.u}$), a regressão linear apresentou um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,84$), com tendência de redução dos valores de S_{lu} à medida que aumenta o número de furos ($y = -0,09x + 3,05$). No entanto, a análise deve ser feita com cautela, pois as barras de erro são mais elevadas, indicando maior dispersão entre as réplicas, o que também foi identificado nos desvios-padrão da tabela. Isso reduz o grau de confiabilidade da tendência observada, embora ela ainda sugira uma possível relação inversa entre o número de furos e a deformação na capacidade última.

Por fim, a Figura 4.59c mostra a variação da rigidez inicial (K_f) com o número de furos, ajustada pela equação $y = 0,70x + 11,62$ e com $R^2 = 0,53$. O coeficiente de determinação moderado indica uma tendência menos definida, embora haja um leve aumento de rigidez com o acréscimo de furos. Essa relação, porém, não é tão evidente quanto nas demais variáveis, o que sugere que outros fatores podem estar influenciando o comportamento inicial dos conectores.

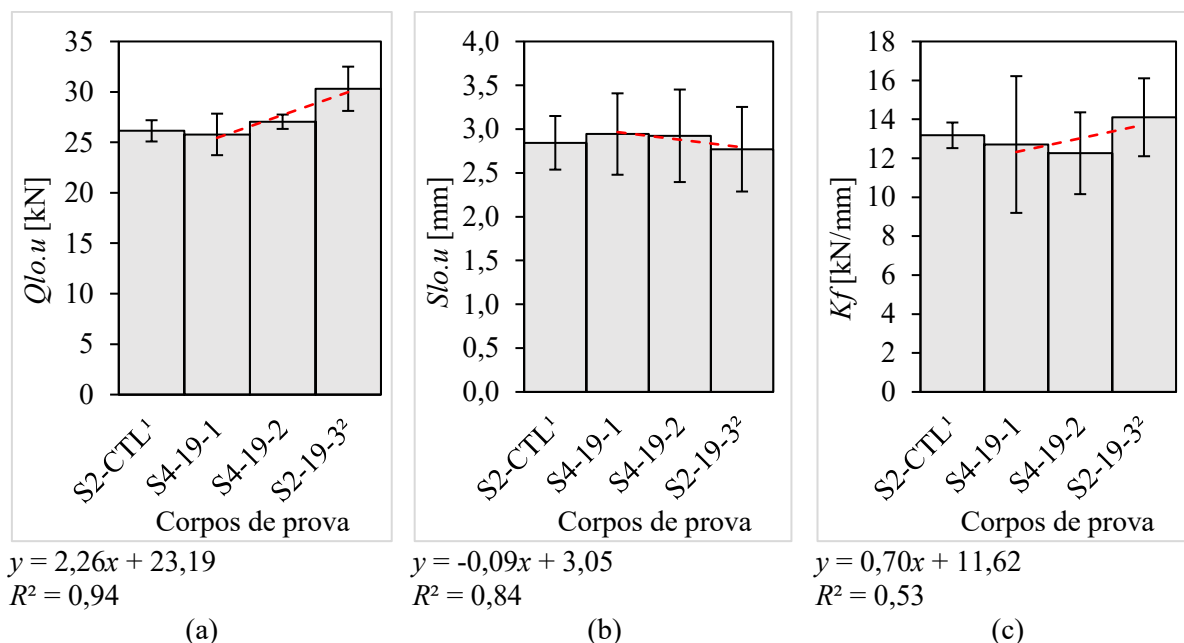


Figura 4.59 – Variação da: (a) capacidade última ($Q_{lo.u}$), (b) deslizamento na capacidade última, e (c) rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função da quantidade de furos.

A Figura 4.60 apresenta a relação entre os principais parâmetros mecânicos dos conectores da Série 4 (capacidade última, deslizamento na capacidade última e rigidez inicial) com o diâmetro dos furos (D_h) e a área de perfuração (A_h). Os gráficos em barras exibem os valores médios acompanhados das respectivas barras de erro, calculadas a partir dos desvios-padrão.

Em relação à capacidade última, observaram-se os melhores ajustes lineares, tanto para o diâmetro dos furos quanto para a área de perfuração. A Figura 4.60a apresenta a equação $y = 0,71x + 16,09$, com $R^2 = 0,76$, enquanto a Figura 4.60d, em função da área de perfuração, resultou em $y = 0,97x + 21,39$, com $R^2 = 0,81$. Esses resultados sugerem que o aumento no diâmetro ou na área perfurada contribui para um ganho na resistência dos conectores, em linha com o observado anteriormente na Figura 4.59a (quantidade de furos), que apresentou $R^2 = 0,94$.

Por outro lado, os demais parâmetros não apresentaram correlações expressivas. Para o deslizamento na capacidade última, a Figura 4.60b mostrou $y = -0,02x + 3,27$ com $R^2 = 0,06$, e a Figura 4.60e indicou $y = -0,03x + 3,16$ com $R^2 = 0,09$, sugerindo que essa variável é pouco sensível às alterações geométricas avaliadas. De forma semelhante, a rigidez inicial apresentou $R^2 = 0,22$ na Figura 4.60c ($y = -0,08x + 15,31$) e $R^2 = 0,17$ na Figura 4.60f ($y = -0,09x + 14,64$), reforçando a ausência de uma tendência clara.

A separação entre as análises por diâmetro dos furos e por área perfurada visou identificar qual variável geométrica teria maior poder explicativo sobre o desempenho

mecânico dos conectores, considerando que a área cresce com o quadrado do diâmetro. No entanto, à exceção da capacidade última, os resultados sugerem que as demais propriedades ($Sl_{o,u}$ e K_f) não demonstraram relação consistente com essas variáveis.

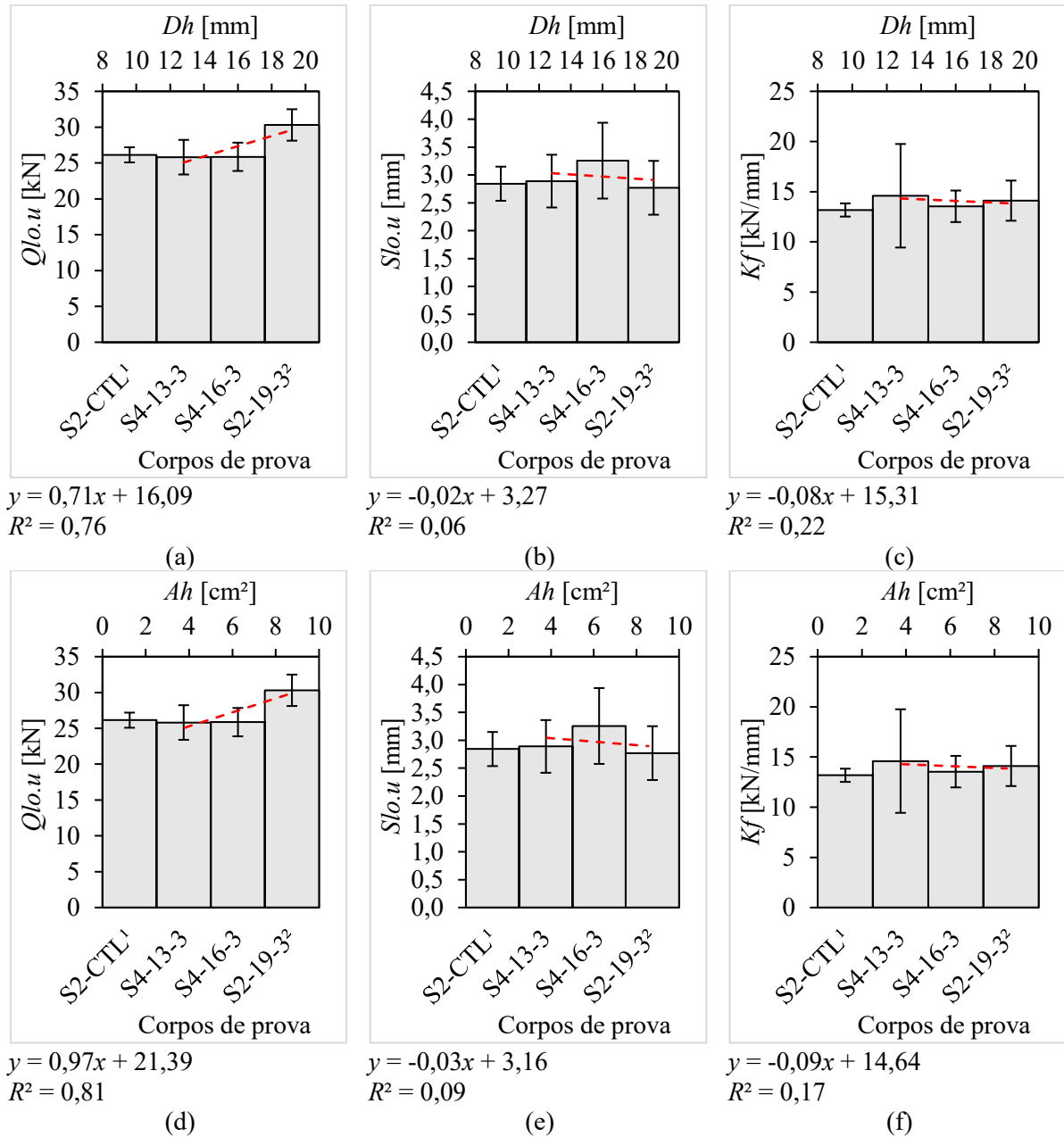


Figura 4.60 – Variação: (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslizamento na capacidade última e (c) da rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função dos diâmetros dos furos (D_h); e variação (a) da capacidade última ($Q_{lo,u}$), (b) do deslizamento na capacidade última, e (c) da rigidez inicial, nos conectores da Série 4, em função área de perfuração (A_h).

4.5.3.2 Energia absorvida absoluta e energia absorvida relativa

A presente seção apresenta os resultados da energia absoluta (W_{abs}) e da energia relativa (W_{rel}) absorvidas pelos conectores da Série 4, conforme os valores obtidos nas integrais

das curvas força versus deslizamento. A energia absoluta corresponde à área total sob a curva até o ponto de ruptura, enquanto a energia relativa é a razão entre essa energia e a força máxima, permitindo avaliar o desempenho dos conectores em termos de capacidade de dissipação de energia em relação à sua resistência máxima.

De modo geral, os conectores S4-19-1 apresentaram os maiores valores médios de energia absoluta (322,12 kN·mm), seguidos pelos modelos S4-16-3 (290,72 kN·mm) e S4-13-3 (267,34 kN·mm). A dispersão dos resultados do S4-19-1, com c_v de 15,55%, foi mais elevada do que a observada nos demais conectores, embora ainda aceitável dentro do contexto dos ensaios experimentais. Já os conectores S4-16-3 apresentaram baixa variabilidade ($c_v = ,88\%$), indicando comportamento mais homogêneo entre réplicas.

No que se refere à energia relativa, o destaque permanece com o conector S4-19-1 (12,45 kN·mm/kN), seguido por S4-16-3 (11,29 kN·mm/kN) e S4-13-3 (10,40 kN·mm/kN). Os conectores de comparação da Série 2, S2-CTL (sem furos) e S2-19-3 (denominado S2-FRP), apresentaram valores médios inferiores: 10,56 e 8,98 kN·mm/kN, respectivamente. Esses dados reforçam a observação de que o aumento do número de furos pode levar à redução da energia absorvida, uma vez que os furos tendem a direcionar a formação de fissuras, acelerando o processo de colapso e antecipando a queda de força.

Tabela 4.26 – Resultados individuais e estatísticos dos parâmetros mecânicos dos conectores da Série 4: energia absoluta absorvida (W_{abs}) e energia relativa absorvida (W_{rel}).

Código	W_{abs}				W_{rel}			
	x_n [kN·mm]	$\bar{x}$ [kN·mm]	s [kN·mm]	c_v [%]	x_n [kN·mm/kN]	$\bar{x}$ [kN·mm/kN]	s [kN·mm/kN]	c_v [%]
S4-CTL-A ¹	289,85				10,64			
S4-CTL-B ¹	255,79	275,80	17,79	6,45	9,82	10,56	0,70	6,59
S4-CTL-C ¹	281,75				11,21			
S4-19-1-A	284,61				11,92			
S4-19-1-B	378,99	322,12	50,08	15,55	13,55	12,45	0,96	7,72
S4-19-1-C	302,77				11,86			
S4-19-2-A	262,14				9,60			
S4-19-2-B	325,48	274,37	46,23	16,85	11,80	10,12	1,48	14,64
S4-19-2-C	235,48				8,97			
S4-19-3-A ²	261,01				8,57			
S4-19-3-B ²	244,29	272,91	36,07	13,22	8,71	8,98	0,60	6,63
S4-19-3-C ²	313,42				9,66			
S4-13-3-A	261,39				11,32			
S4-13-3-B	286,58	267,34	17,06	6,38	10,35	10,40	0,90	8,62
S4-13-3-C	254,05				9,53			
S4-16-3-A	277,68				10,70			
S4-16-3-B	297,42	290,72	11,29	3,88	12,47	11,29	1,03	9,09
S4-16-3-C	297,05				10,69			
Obs. 1: conector proveniente da Série 2, correspondente à configuração sem furos (S2-CTL).								
Obs. 2: conector proveniente da Série 2, identificado naquela série como S2-FRP.								

A Figura 4.61 apresenta a variação da energia absoluta (W_{abs}) e da energia relativa (W_{rel}) absorvidas pelos conectores da Série 4 em função da quantidade de furos. Os gráficos foram construídos com base nas médias dos valores obtidos experimentalmente, sendo acompanhados por barras de erro que representam os desvios-padrão de cada configuração.

Na Figura 4.61a, observa-se uma tendência de redução da energia absoluta com o aumento da quantidade de furos, descrita pela equação da regressão linear $y = -24,61x + 339,02$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,77$, o que indica uma correlação razoável. O conector S4- C_{TL} (sem furos), utilizado como grupo controle, apresentou valor médio de energia semelhante ao dos conectores S4-19-2 e S2-19-3, sugerindo que a presença de dois ou três furos tende a nivelar os valores de W_{abs} em relação ao conector sem perfurações.

A Figura 4.61b, por sua vez, apresenta a variação da energia relativa, com tendência de queda mais acentuada conforme a equação $y = -1,73x + 13,98$ e um excelente coeficiente de determinação $R^2 = 0,96$. Esse resultado indica que a quantidade de furos explica quase totalmente a variação observada em W_{rel} . O grupo controle (S4- C_{TL}) apresentou valor praticamente idêntico ao do conector S4-19-2. Esses dados reforçam a percepção de que, quanto maior o número de furos, menor a capacidade de absorção de energia por unidade de força máxima, possivelmente devido à maior propensão à fissuração e ruptura antecipada.

A Figura 4.61a mostra que a dispersão dos valores de energia absoluta absorvida foi moderada em todas as configurações, com desvios-padrão de 36,07 kN·mm para o conector S2-19-3 (13,22%), 50,08 kN·mm para o S4-19-1 (15,55%) e 46,23 kN·mm para o S4-19-2 (16,85%), refletindo-se nas barras de erro apresentadas no gráfico. Já a Figura 4.61b, que apresenta os valores de energia relativa absorvida em função da quantidade de furos, indica uma dispersão menor em média quando comparada à Figura 4.61a. Os desvios-padrão variaram entre 0,60 e 1,48 kN·mm/kN, com coeficientes de variação de 6,63% (S2-19-3), 7,72% (S4-19-1) e 14,64% (S4-19-2), o que é coerente com as barras de erro mais curtas observadas no gráfico. Esses dados reforçam a consistência das medições de energia relativa absorvida e indicam boa reprodutibilidade entre as réplicas testadas.

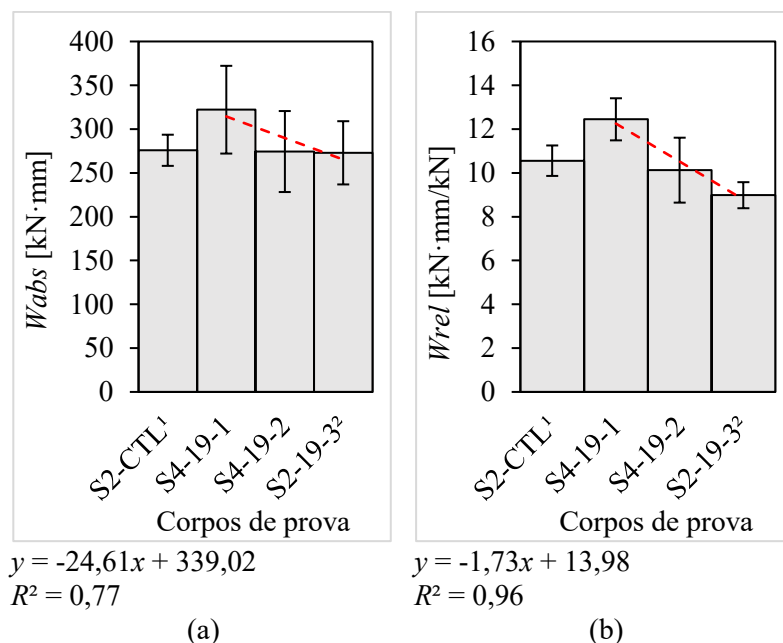


Figura 4.61 – Variação da: (a) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (b) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função da quantidade de furos.

A Figura 4.62 mostra a variação da energia absorvida, absoluta (W_{abs}) e relativa (W_{rel}), em função do diâmetro dos furos (D_h) e da área de perfuração (A_h) nos conectores da Série 4. Os coeficientes de determinação obtidos foram baixos em todos os casos, indicando ausência de correlação significativa entre essas variáveis. Para W_{abs} , os valores de R^2 foram 0,05 (Figura 4.62a) e 0,03 (Figura 4.62c), com equações $y = 0,88x + 263,07$ e $y = 0,88x + 271,62$, respectivamente. Para W_{rel} , os coeficientes foram ligeiramente superiores, mas ainda insuficientes para indicar tendência: $R^2 = 0,37$ (Figura 4.62b, $y = -0,22x + 13,77$) e $R^2 = 0,43$ (Figura 4.62d, $y = -0,32x + 12,17$). Esses resultados confirmam que, diferentemente da quantidade de furos, nem o diâmetro individual nem a área total perfurada mostraram influência clara sobre a energia absorvida pelos conectores testados.

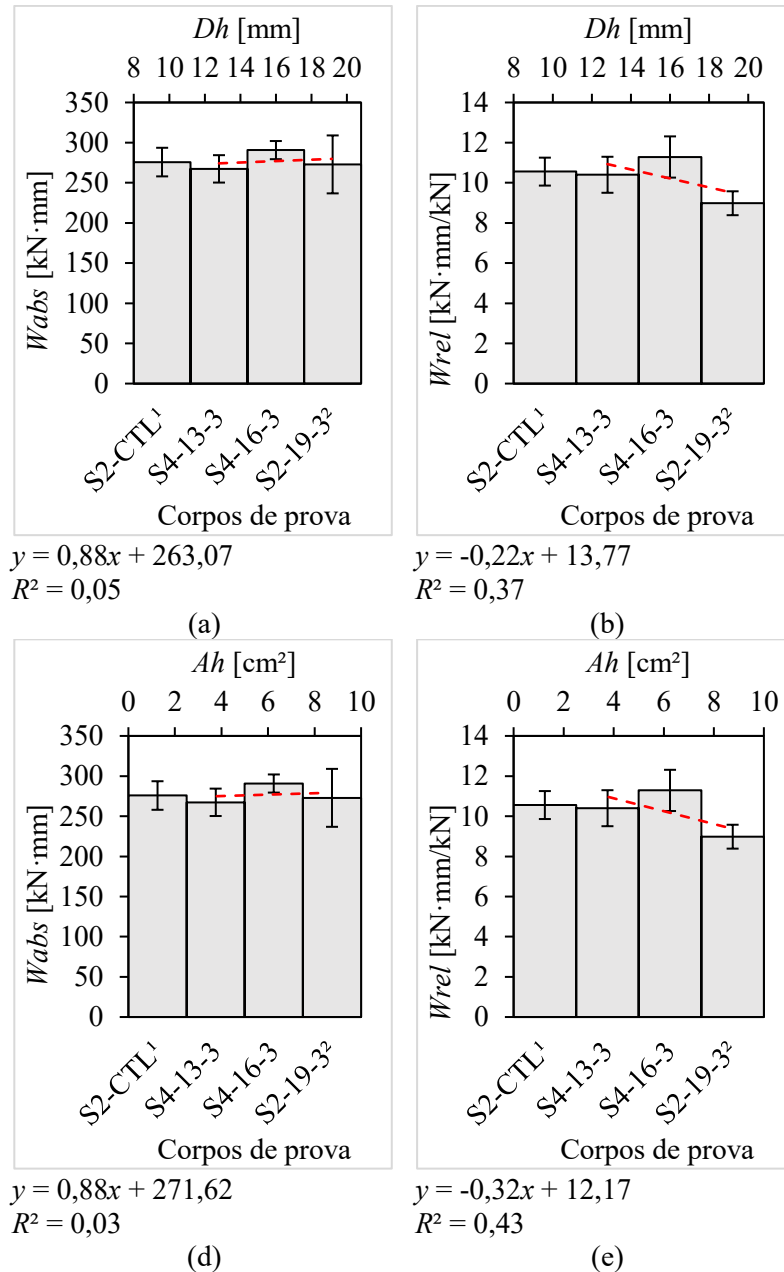


Figura 4.62 – Variação da: (a) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (b) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função do diâmetro dos furos (D_h); e (c) energia absoluta absorvida (W_{abs}); e (d) energia relativa absorvida, nos conectores da Série 4, em função da área de perfuração (A_h).

4.5.4 Avaliação da ductilidade

O tópico “4.5.4 Avaliação da ductilidade” apresenta os resultados da classificação dos conectores da Série 4 conforme os critérios estabelecidos pela norma prEN 1994-1-1, com base em parâmetros como força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e a categoria de ductilidade atribuída (D1, D2 ou D3). Conforme apresentado na Tabela 4.27, apenas os conectores S4-19-1 e S4-19-2 atingiram a classificação D3, enquanto os demais conectores foram enquadrados na categoria D2. Esse resultado evidencia que os conectores com

uma menor quantidade de furos, como os S4-19-1 (1 furo) e S4-19-2 (2 furos), apresentaram maior capacidade de deformação antes do colapso, atingindo deslizamentos superiores a 10 mm em δ_{uk} , conforme exigido para a categoria D3.

Por outro lado, nenhum conector com três furos pôde ser classificado como D3. Isso pode ser atribuído ao fato de que uma maior quantidade de furos tende a facilitar a formação e o desenvolvimento fissuras, que acabam por reduzir a extensão do regime pós-pico, antecipando a queda de resistência antes que o deslizamento atinja o limite mínimo de 10 mm exigido para a classificação como D3. Dessa forma, mesmo com comportamento inicialmente dúctil, os conectores mais perfurados colapsaram mais rapidamente, comprometendo sua qualificação segundo os critérios normativos de ductilidade.

Tabela 4.27 – Classificação da ductilidade dos conectores da Série 4 conforme prEN 1994-1-1: força máxima (P_e), resistência característica (P_{Rk}), deslizamento na resistência característica (δ_{ek}), deslizamento na capacidade última (δ_{uk}), rigidez inicial (K_f) e categoria atribuída (D1, D2 ou D3).

Identificação	P_e [kN]	P_{Rk} [kN]	δ_{ek} [mm]	δ_{uk} [mm]	K_f [kN/mm]	Categoria de ductilidade
S4-19-1	24,39	21,95	1,59	10,74	13,84	D3
S4-19-2	22,50	22,68	1,66	10,12	13,63	D3
S4-19-3 ¹	28,28	25,45	1,74	8,32	14,60	D2
S4-16-3	24,34	21,91	1,46	6,63	15,03	D2
S4-13-3	25,27	22,74	1,64	6,77	15,92	D2
Obs. 1: conector proveniente da Série 2, identificado naquela série como S2-FRP.						

A Figura 4.63 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 4: (a) S4-19- n_h ; e (b) S4- D_h -3. apresenta a modelagem das curvas força versus deslizamento relativo utilizadas para a classificação da ductilidade dos conectores da Série 4, divididas em dois conjuntos: (a) conectores com o mesmo diâmetro de furo (19 mm) e diferentes quantidades de furos (S4-19-nh) e (b) conectores com três furos e diferentes diâmetros (S4-Dh-3).

Na Figura 4.63a, observa-se que o conector S4-19-1 apresentou valores de força superiores aos demais especificamente no trecho plástico horizontal. As curvas de S4-19-2 e S4-19-3, por sua vez, mostraram-se bastante próximas nesse mesmo trecho, com o S4-19-2 atingindo valores ligeiramente superiores aos do S4-19-3. A rigidez inicial das três configurações foi bastante semelhante, indicando resposta compatível no início do carregamento.

Na Figura 4.63b, o conector S4-19-3 apresentou valores de força superiores aos dos conectores S4-16-3 e S4-13-3 ao longo do trecho plástico horizontal. As curvas desses dois

últimos mostraram comportamentos muito próximos, com o S4-13-3 apresentando valores levemente maiores que o S4-16-3. Assim como no primeiro conjunto, a rigidez inicial dos três conectores foi bastante semelhante, demonstrando comportamento consistente no regime elástico, independentemente da variação no diâmetro dos furos.

Assim, os resultados indicam que conectores com um ou dois furos (S4-19-1 e S4-19-2) apresentaram maior ductilidade, sendo classificados como D3, enquanto os com três furos foram limitados à categoria D2 devido ao colapso precoce induzido por maior fissuração. A rigidez inicial foi semelhante entre todas as configurações, sugerindo que as variações geométricas influenciam mais a ductilidade do que a resposta inicial.

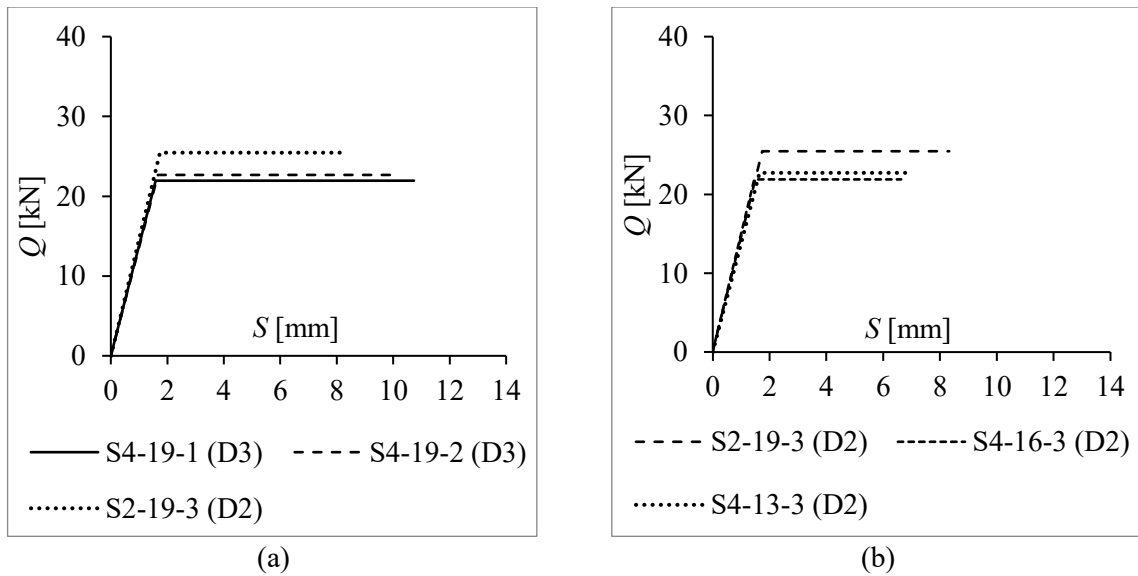


Figura 4.63 – Modelagem das curvas para classificação da ductilidade dos conectores da Série 4: (a) S4-19- n_h ; e (b) S4- D_h -3.

5 PROPOSTA DE UM MODELO ANALÍTICO DA CAPACIDADE RESISTENTE DE CONEXÕES PERFOFRP SOB ESFORÇOS DE CISALHAMENTO

Conforme evidenciado nos resultados do programa experimental e na literatura abordada na revisão bibliográfica, a falha das conexões PERFOFRP é condicionada por:

- a) ruptura do conector na região situada entre as camadas de concreto ($Q_{GFRP.exp}$); ou
- b) ruptura da conexão na região ancorada no concreto ($Q_{GFRP.conf}$).

A capacidade resistente do conector é, portanto, definida pelo menor valor entre as duas condições expressas pela Equação 5.1.

$$Q_{GFRP} = \min \begin{cases} Q_{GFRP.exp} \\ Q_{GFRP.conf} \end{cases} \quad 5.1$$

Essa abordagem se justifica porque, uma vez atingida a capacidade resistente de qualquer uma dessas duas regiões, a separação das camadas de concreto ocorre inevitavelmente, caracterizando a falha da conexão.

A capacidade resistente do conector na região de GFRP confinado no concreto, por sua vez, é dada pelo menor valor entre:

- a) o somatório da resistência do concreto nos furos (Q_{pin}) com a resistência de aderência entre o GFRP e o concreto (Q_{adh})
- b) o valor da resistência de cisalhamento do GFRP confinado no concreto ($Q_{GFRP.cis}$).

Assim, $Q_{GFRP.conf}$ pode ser escrito nos termos indicados na Equação 5.2:

$$Q_{GFRP.conf} = \min \begin{cases} Q_{pin} + Q_{adh} \\ Q_{GFRP.cis} \end{cases} \quad 5.2$$

Isso se justifica porque, em termos teóricos, se a soma da resistência proporcionada pela aderência com a resistência dos pinos de concreto fosse ultrapassada antes que a resistência ao cisalhamento do PRFV ancorado fosse atingida, ocorreria a falha da conexão, mesmo com o conector permanecendo íntegro. No entanto, a condição de ruptura dos pinos de concreto, após a perda da aderência entre o PRFV e o concreto, não pôde ser verificada nos resultados experimentais desta pesquisa. Dessa forma, o modelo que prevê essa capacidade resistente não

pôde ser validado, sendo apresentado apenas como uma proposta teórica para descrever esse possível mecanismo de falha.

A aplicação deste modelo deve ser restrita às condições investigadas nesta tese: conectores PERFOFRP laminados por infusão com GFRP de espessura média de 3,87 mm na Série 1 (dez camadas CSM) e de 2,00 mm nas Séries 2, 3 e 4 (cinco camadas CSM); na Série 1, furos de diâmetro fixo de 19 mm, com combinações de espaçamento entre furos S_h de 30, 40 e 57 mm e distância à borda interna S_b de 15, 25 e 35 mm; e, na Série 4, variação de diâmetros de 12,70 mm, 15,88 mm e 19,05 mm com 1, 2 ou 3 furos por região de ancoragem, mantendo-se o espaçamento relativo constante. As propriedades do concreto correspondem a $f_{ck} = 43,25$ MPa (Série 1) e $f_{ck} = 38,57$ MPa (Séries 2–4), com demais caracterizações apresentadas no Capítulo 4. Extrapolações para espessuras de laminado, combinações S_h – S_b , diâmetros/quantidades de furos ou classes de concreto fora dessas faixas devem ser feitas com cautela e carecem de validação experimental ou numérica adicional.

5.1 Ruptura no concreto nos furos

A ruptura do concreto dos furos caracteriza-se pela formação de pinos de concreto entre os furos e o subsequente cisalhamento desses elementos sob a ação de esforços de cisalhamento. Para avaliar a resistência desse mecanismo, foram realizados três ensaios experimentais utilizando um conector metálico projetado de forma a não romper, de modo que a falha fosse restrita ao concreto que preenche os furos (ver Figura 2.6d e Figura 4.36a a c).

Os resultados obtidos foram 22,00 kN, 22,69 kN e 23,10 kN (média de 22,60 kN), considerando o limite do regime elástico, para pinos de concreto com diâmetro de 19,05 mm. Caso fosse considerada a parcela plástica mobilizada após o esgotamento da elasticidade, o valor estimado poderia chegar a 30,25 kN, o que representa um acréscimo de aproximadamente 37 %. A área de cisalhamento de cada pino foi calculada como $A_h = \frac{\pi d^2}{4}$, resultando em aproximadamente 285 mm² por pino. Considerando três pinos por conector, a área total de cisalhamento foi de 855 mm². Com base nessas informações, a tensão média de cisalhamento obtida experimentalmente foi de aproximadamente 26,40 MPa.

Recomenda-se a adoção da Equação 5.3, originalmente desenvolvida para conectores do tipo PERFOBOND (OGUEJIOFOR; HOSAIN, 1997), em situações análogas em que a ruptura ocorre nos pinos de concreto (Q_{pin}):

$$Q_{lo} = \beta_1 \cdot h \cdot t \cdot f_{ck} + \beta_2 \cdot A_{tr} \cdot f_y + \beta_3 \cdot n_h \cdot D_h^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} + \beta_4 \cdot A_{cc} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad 5.3$$

Em que:

- h [mm] e t [mm] são, respectivamente, a altura e a espessura do conector;
- f_{ck} [MPa] é a resistência à compressão do concreto;
- A_{tr} [mm²] é a área da armadura transversal que passa pelos furos;
- f_y [MPa] é a resistência ao escoamento do aço;
- n_h é o número de furos no conector;
- D_h [mm] é o diâmetro do furo;
- A_{cc} [mm²] é a área de cisalhamento de concreto por conector; e
- β_i são os coeficientes obtidos por análise de regressão que melhor se ajustaram aos dados experimentais e numéricos disponíveis ($\beta_1 = 4,470$; $\beta_1 = 0,900$; $\beta_2 = 3,300$; $\beta_4 = 0,010$).

Eliminando-se as duas primeiras parcelas e a última da equação, por não se aplicarem ao caso específico dos conectores PERFOFRP analisados nesta tese (efeito da frente de concreto, da armadura atravessando os furos e da aderência entre o conector de aço e o concreto, respectivamente), obtém-se o valor de 22,31 kN, correspondente apenas à ruptura dos pinos de concreto. Esse valor representa uma **redução de 15,5%** em relação ao resultado experimental de 26,40 kN, sendo considerado, portanto, uma aproximação satisfatória.

Cabe destacar que a reserva plástica observada nos ensaios com conectores metálicos, caracterizada pelo deslizamento no interior do corpo de prova e pela fissuração do concreto, não ocorre nos conectores de FRP. Assim, essa contribuição adicional de resistência não foi considerada, restringindo-se a análise ao regime elástico. Essa decisão assegura a coerência entre o modelo proposto e o comportamento experimental observado nesta pesquisa.

Como a aplicação direta da Equação 5.3 resultou em uma subestimação de 15,5% em relação ao valor experimental, procedeu-se à calibração do coeficiente β_3 . O valor original de $\beta_3 = 3,300$ forneceu uma estimativa de 22,31 kN, enquanto o ajuste pela razão entre os valores experimental (26,40 kN) e teórico indicou um coeficiente calibrado de $\beta_3 = 3,90$. Com esse ajuste, a resistência prevista pelo modelo passa a coincidir com a obtida em ensaio, eliminando o erro identificado e aumentando a precisão da formulação.

5.2 Ruptura no GFRP

O presente tópico aborda modelos destinados à previsão da ruptura em conectores PERFOFRP condicionada ao comportamento do PRFV. São analisados quatro cenários

distintos: a ruptura do material na região situada entre as camadas de concreto, a ruptura do PRFV confinado no concreto, a perda de aderência na interface PRFV-concreto e os efeitos do enrijecimento aplicado na região exposta.

5.2.1 GFRP na região entre camadas de concreto

A ruptura do PRFV na região situada entre as camadas de concreto caracteriza-se pelo surgimento de fissuras verticais e/ou inclinadas concentradas nessa faixa do conector, conforme ilustrado na Figura 2.6b e na Figura 2.7. Esse mesmo comportamento foi observado nos ensaios desta pesquisa, em que diferentes conectores apresentaram esse tipo de falha, exemplificado na Figura 4.5a, Figura 4.5b e Figura 4.5c.

A previsão da ruptura do GFRP na região situada entre as camadas de concreto requer a adoção de um modelo que considere de forma explícita a interação entre as tensões normais de flexão e as tensões de cisalhamento. Em laminados com fibras distribuídas aleatoriamente, como é o caso dos conectores analisados, admite-se um comportamento quase isotrópico no plano, o que possibilita o uso de critérios clássicos de falha aplicados a materiais homogêneos. Nesse contexto, foi adotado o Critério de Mohr, por se tratar de um modelo simples e ao mesmo tempo eficaz para representar situações em que a ruptura é condicionada pela atuação combinada de tensões normais e de cisalhamento. O critério estabelece que a falha ocorre quando a tensão normal máxima, associada à flexão e atuante na fibra mais solicitada à tração, interage com a tensão de cisalhamento máxima, desenvolvida na linha neutra da seção. Essa formulação traduz de maneira adequada o comportamento observado nos ensaios, em que as fissuras se formaram segundo planos inclinados, típicos de estados de tensão combinados. Ainda que, do ponto de vista estritamente físico, as tensões de tração e cisalhamento não atuem exatamente no mesmo ponto material, adota-se de forma conservadora a hipótese de que ambas possam ser consideradas como atuantes simultaneamente em um mesmo plano inclinado de ruptura, hipótese coerente com a característica das falhas registradas experimentalmente. A partir dessa premissa, a tensão normal de flexão é obtida pela Equação 5.4:

$$\sigma_x = \frac{M}{I} \cdot z \quad 5.4$$

em que M é o momento fletor ($M = P \cdot L$), P é a força aplicada, L é o comprimento em balanço, I é o momento de inércia da seção e z é a distância da linha neutra até a fibra mais distante. Substituindo, tem-se a Equação 5.5:

$$\sigma_x = \frac{P \cdot L \cdot z}{I} \quad 5.5$$

Define-se o coeficiente de flexão $a = L \cdot y / I$, conforme Equação 5.6:

$$\sigma_x = P \cdot a \quad 5.6$$

A tensão de cisalhamento para uma seção retangular é estimada pela Equação 5.7:

$$\tau_{yz} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{A} \quad 5.7$$

Onde $V = P$ e A é a área da seção transversal, resultando na Equação 5.8:

$$\tau_{yz} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{A} \quad 5.8$$

Define-se o coeficiente de cisalhamento $b = 3 / (2 \cdot A)$, conforme Equação 5.9:

$$\tau_{yz} = b \cdot P \quad 5.9$$

A tensão principal máxima (σ_1) é obtida pela transformação de tensões em estado plano, de acordo com a Equação 5.10:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 5.10$$

Substituindo $\sigma_x = P \cdot a$ e $\tau_{yz} = P \cdot b$, tem a Equação 5.11:

$$\sigma_1 = P \cdot \left(\frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} \right) \quad 5.11$$

Define-se o termo auxiliar A_i conforme Equação 5.12:

$$A_i = \frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} \quad 5.12$$

Assim, chega-se à Equação 5.13.

$$\sigma_1 = P \cdot A_i \quad 5.13$$

Para o Critério de Mohr, a condição de falha adota a forma apresentada na Equação 5.14:

$$\frac{\sigma_1}{f_t} - \frac{\tau_{yz}}{f_v} = 1 \quad 5.14$$

Substituindo σ_1 e τ_{yz} obtém-se a Equação 5.15:

$$\frac{P \cdot A_i}{f_t} - \frac{P \cdot b}{f_v} = 1 \quad 5.15$$

Fazendo $P = Q_{PRF.exp}$, chega-se à Equação 5.16:

$$Q_{PRFV.exp} = \frac{1}{\frac{A_i}{f_t} - \frac{b}{f_v}} \quad 5.16$$

Onde:

- $Q_{GFRP.exp}$ é a resistência quando a ruptura ocorre na região de GFRP na região entre camadas de concreto;
- f_t é a resistência última à tração do GFRP;
- f_v é a resistência última ao cisalhamento do GFRP;
- A_i é o fator auxiliar.

Para aplicação ao caso dos conectores PERFOFRP, considerou-se um conector com espessura $b = 2$ mm, altura $h = 200$ mm, comprimento $L = 50$ mm e distância até a fibra mais tracionada $y = 100$ mm. Assim:

$$A_s = b \cdot h = 2 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} = 400 \text{ mm}^2$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{2 \text{ mm} \cdot (200 \text{ mm})^3}{12} = 1.333.333 \text{ mm}^4$$

O coeficiente de flexão é:

$$a = \frac{L \cdot y}{I} = \frac{50 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}}{1.333.333 \text{ mm}^4} = 0,00375 \text{ mm}^{-2}$$

O coeficiente de cisalhamento é:

$$b = \frac{3}{2 \cdot A} = \frac{3}{2 \cdot 400 \text{ mm}^2} = 0,00375 \text{ mm}^{-2}$$

O termo auxiliar fica (Equação 5.17):

$$A_i = \frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} \quad 5.17$$

$$A_i = \frac{0,00375 \text{ mm}^{-2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{0,00375 \text{ mm}^{-2}}{2}\right)^2 + (0,00375 \text{ mm}^{-2})^2}$$

$$A_i = 0,006075 \text{ mm}^{-2}$$

Os valores experimentais de resistência do material foram $f_t = 195,40 \text{ MPa}$ e $f_v = 139,61 \text{ MPa}$. Aplicando o Critério de Mohr (Equação 5.18):

$$Q_{PRFV.exp} = \frac{1}{\frac{A_i}{f_t} - \frac{b}{f_v}} \quad 5.18$$

$$Q_{PRFV.exp} = \frac{1}{\frac{0,006075 \text{ mm}^{-2}}{195,40 \text{ MPa}_t} - \frac{0,00375 \text{ mm}^{-2}}{139,61 \text{ MPa}}} = 23,8 \text{ kN}$$

Os resultados obtidos indicaram que o modelo analítico baseado no Critério de Mohr apresentou boa correlação com o comportamento experimental, mas com superestimação da resistência em torno de +16% (23,8 kN previsto frente a 20,5 kN obtido experimentalmente). Essa diferença, embora relativamente pequena em termos de comparação direta, adquire

relevância do ponto de vista de segurança estrutural, já que uma previsão superestimada poderia conduzir a projetos com capacidade resistente inferior à necessária, aumentando o risco de falhas prematuras. Nesse sentido, recomenda-se a adoção de coeficientes de segurança mais conservadores quando da aplicação prática do modelo, de modo a compensar a discrepância observada e garantir que o dimensionamento permaneça dentro de limites seguros. Essa abordagem está em consonância com os princípios normativos de projeto, nos quais fatores parciais de segurança são empregados para ajustar incertezas associadas a modelos analíticos e à variabilidade dos materiais.

5.2.2 Região de GFRP confinado

A ruptura do PRFV confinado ocorre na região em que o laminado está totalmente envolvido pelo concreto, sem contato direto com o material isolante. Esse modo de falha se manifesta pelo desenvolvimento de fissuras longitudinais e pela fratura do compósito junto à interface de ancoragem, conforme representado na Figura 2.6c. Nos ensaios desta pesquisa, a ocorrência desse tipo de ruptura foi registrada em diferentes modelos de conectores, conforme ilustrado na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.

Para laminados reforçados com mantas do tipo CSM, é razoável admitir um comportamento quase isotrópico no plano do laminado. Entretanto, a presença de furos cria trajetórias preferenciais de fissuração, fazendo com que as falhas se propaguem ao longo de linhas de menor resistência, resultando em rupturas localizadas na seção líquida.

Ensaio experimentais de cisalhamento duplo mostraram que, para os conectores de GFRP confinados, variações na posição e no espaçamento dos furos exerceram impacto pouco significativo sobre a capacidade última. Essa evidência reforça a hipótese de que o controle da área líquida vertical, definida pela altura total do conector, prevalece como fator determinante para o modo de ruptura.

Por analogia com ligações por pinos em chapas de aço, adota-se o coeficiente 0,6 aplicado à tensão de cisalhamento. A ABNT NBR 8800 (ABNT, 2024) (item 5.2.6.1(d)) prescreve, para a verificação de ruptura da seção líquida por cisalhamento em chapas tracionadas por pinos, a parcela resistente representada por $0,6 \times f_u \times A_{sf}$, o que consolida o uso normativo desse fator, sendo que f_u é a tensão de escoamento do aço e A_{sf} é a área da seção líquida.

O emprego de 0,6 decorre de diretrizes que incorporam a não uniformidade de tensões no plano de cisalhamento líquido, as imperfeições geométricas associadas a furos/roscas e distâncias à borda, a interação com mecanismos locais de rasgo/esmagamento,

além da compatibilização com os coeficientes de segurança adotados pela norma. Assim, estender esse valor aos conectores PERFOFRP, por analogia, constitui uma aproximação conservadora e coerente com a prática de projeto nacional.

Assim, estabelece-se um modelo único, de forma simplificada, que estima a força última de cada conector considerando a área líquida vertical resultante, já descontado o diâmetro dos furos. Desse modo, a capacidade última ($Q_{GFRP.conf.}$) é calculada pela Equação 5.19:

$$Q_{PRFV.con} = 0,6 \cdot t \cdot (h - n_h \cdot D_h) \cdot f_v \quad 5.19$$

Onde:

- t é a espessura do conector (3,87 mm);
- h é a altura do conector (200 mm);
- n_{ho} é q quantidade de furos (3);
- D_h é o diâmetro dos furos (19,05 mm);
- f_v é a tensão de cisalhamento do conector (139,61 MPa).

No caso específico dos conectores de GFRP, a utilização da resistência última ao cisalhamento (f_v) em detrimento da resistência última à tração (f_u) se mostra mais adequada, pois reflete de maneira mais fiel a propriedade mecânica mobilizada durante os ensaios push-out. Diferentemente do aço, em que a ruptura na seção líquida de chapas tracionadas por pinos está associada a um estado de tensões dominado pela tração, nos conectores de GFRP confinados o mecanismo de falha é condicionado pela propagação de fissuras ao longo da seção líquida, controlada essencialmente pela resistência ao cisalhamento do compósito. Assim, a adoção de f_v como parâmetro fundamental garante maior representatividade do comportamento real do material e assegura que o modelo permaneça consistente com os resultados experimentais, evitando superestimações que poderiam comprometer a segurança no dimensionamento.

Como todos os conectores avaliados possuem a mesma seção líquida vertical ($t = 3,87$ mm, $h = 200$ mm, $n_{ho} = 3$, $D_h = 19,05$ mm e $f_v = 139,61$ MPa), foi possível aplicar a mesma expressão para estimar a capacidade última em todas as configurações da Série 1, resultando em um único valor teórico (Tabela 5.1). Com isso, verificou-se uma diferença

percentual média em valor absoluto de aproximadamente 6,6% em relação aos resultados experimentais, o que demonstra boa coerência da abordagem.

Tabela 5.1 – Comparação entre os valores estimados pelo modelo, considerando a ruptura no GFRP confinado, e os resultados experimentais para conectores do tipo PERFOFRP.

Conector	Modelo [kN]	Experimental [kN]	Erro [%]
S1-57-35	46,30	45,30	+2,2
S1-57-25	46,30	47,08	-1,6
S1-57-15	46,30	43,16	+7,3
S1-40-35	46,30	45,25	+2,3
S1-40-25	46,30	41,00	+12,9
S1-40-15	46,30	45,99	+0,7
S1-30-35	46,30	38,59	+20,0
S1-30-25	46,30	40,65	+13,9
S1-30-15	46,30	45,49	+1,8
Média	46,30	43,60	+6,6

Apesar da boa concordância entre o modelo simplificado e os resultados experimentais, a diferença observada de 6,6% em termos médios evidencia que o modelo tende a superestimar a resistência dos conectores de GFRP confinados. Essa condição, ainda que menos expressiva do que a verificada no Critério de Mohr, deve ser considerada uma limitação do ponto de vista da segurança estrutural, já que previsões superestimadas podem induzir a projetos com menor margem de confiabilidade. Por esse motivo, recomenda-se que a aplicação prática do modelo seja acompanhada da introdução de coeficientes de segurança adequados às incertezas associadas à formulação analítica e à variabilidade dos materiais compósitos. A utilização de tais fatores parciais permitiria ajustar o valor teórico previsto a níveis compatíveis com a segurança exigida em projeto, garantindo que a estimativa permaneça conservadora mesmo diante de dispersões experimentais e simplificações assumidas no modelo.

5.2.3 Ruptura por perda de aderência

Além da falha do GFRP nas regiões perfuradas, outro modo de ruptura identificado é a perda de aderência entre o conector e o concreto de ancoragem, causada pelo deslizamento progressivo que reduz as tensões de adesão e atrito na interface (ver Figura 2.11c, Figura 4.7 e Figura 4.36d a f). Para estimar a força máxima mobilizada por esse mecanismo, considera-se que o GFRP funciona como uma superfície de ancoragem dupla, e a tensão média de aderência é obtida por ensaios específicos em conectores sem perfurações, isolando o efeito da aderência pura.

Para isso, foram realizados dois ensaios (com três réplicas cada) em conectores com as mesmas dimensões (200 mm × 50 mm × 2 faces), que apresentaram valores médios de ruptura de 31,98 kN (espessura de 3,87 mm) e 26,14 kN (espessura de 2,00 mm). Observa-se que a espessura do conector, nesse caso, não influencia significativamente o resultado, sendo as variações atribuídas a fatores como qualidade do concreto, do GFRP e da aderência entre ambos. A área total de contato (A_{adh}) foi calculada considerando as duas faces do conector em contato com o concreto:

$$A_{adh} = 2 \cdot h \cdot l = 2 \cdot 200 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm} = 20.000 \text{ mm}^2$$

Onde:

- h é a altura do conector;
- l é a largura do conector na região de GFRP confinado.

A tensão média de aderência (f_{adh}) resultante foi, portanto, aproximadamente:

$$f_{adh} = \frac{\frac{31.980 \text{ N}}{20.00 \text{ mm}^2} + \frac{26.140 \text{ N}}{20.000 \text{ mm}^2}}{2} = \frac{1,60 \text{ MPa} + 1,31 \text{ MPa}}{2} = 1,45 \text{ MPa}$$

Assim, para outros conectores com configuração semelhante, a força última mobilizada por aderência pode ser estimada pela Equação 5.20 a seguir:

$$Q_{adh} = A_{adh} \cdot f_{adh} \quad 5.20$$

Para conectores com furos, recomenda-se que a área de aderência seja corrigida pelo desconto da área perfurada, já que os furos reduzem efetivamente a superfície de contato disponível para transferência de tensões de adesão. Assim, a equação para conectores perfurados torna-se (Equação 5.21):

$$Q_{adh} = f_{adh} \cdot (A_{adh} - n_h A_h) \quad 5.21$$

Onde:

- n_h é a quantidade de furos,

- A_h é a área de cada furo

Os valores de tensão média de aderência obtidos neste estudo (1,45 MPa) mostram-se coerentes com resultados disponíveis na literatura. Diógenes (2013), em ensaios realizados com conectores destinados a estruturas mistas de aço e concreto, reportou valores variando entre 1,42 MPa e 1,79 MPa. Essa proximidade entre os resultados reforça a representatividade do parâmetro adotado e sugere que o mecanismo de transferência de esforços por aderência em conectores de GFRP apresenta ordem de grandeza compatível à observada em sistemas já consolidados de ligação aço–concreto, conferindo maior confiabilidade ao modelo proposto para estimativa da força resistente mobilizada por esse mecanismo.

5.2.4 Enrijecimento da região exposta

A presença de descontinuidades geométricas, como furos, entalhes ou mudanças bruscas de espessura, gera concentrações de tensões que podem reduzir a capacidade resistente de materiais frágeis e com baixa ductilidade, como os laminados de GFRP, como é o caso das rupturas observadas na Figura 4.45.

Para componentes metálicos, a concentração de tensões costuma ser estimada por meio de equações analíticas clássicas, mas em conectores do tipo PERFOFRP essa abordagem não capta adequadamente fatores como aderência, atrito e redistribuição de tensões na interface com o concreto. Por isso, recomenda-se utilizar um fator de concentração de tensões calibrado a partir de ensaios experimentais, representando de forma mais realista o comportamento de ruptura.

Para os conectores avaliados na Série 3, foram realizados ensaios de cisalhamento duplo com variação controlada da espessura do GFRP na região exposta, obtida por meio de reforços colados. A espessura da parte do GFRP confinada no concreto permaneceu constante em 2 mm, enquanto a região exposta variou de 2 mm a 10 mm, permitindo diferentes níveis de descontinuidade de espessura. A partir do modelo baseado no Critério de Mohr, calculou-se a capacidade última teórica (P) para cada configuração, que foi comparada aos valores médios experimentais ($Q_{lo,u}$) para se determinar a razão $P / Q_{lo,u}$. A variável geométrica fundamental foi definida como a razão (R) entre a espessura da região exposta (t_{exp}) e a da região confinada (t_{con}):

$$R = \frac{t_{exp}}{t_{con}} \quad 5.22$$

Os resultados mostraram que a razão ($P / Q_{lo,u}$) varia de forma aproximadamente exponencial com R (Figura 5.1).

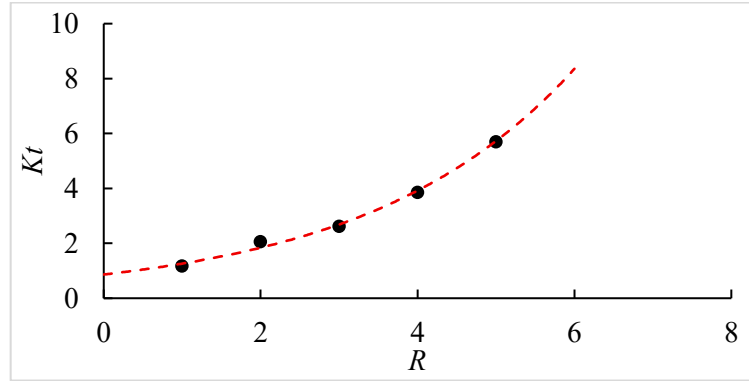


Figura 5.1 – Variação de K_t em função de R .

Assim, ajustou-se uma regressão exponencial, resultando na seguinte expressão do fator empírico:

$$K_t(R) = 0,864 \cdot e^{0,378R} \quad 5.23$$

O coeficiente de determinação foi elevado ($R^2 = 0,995$), indicando excelente aderência do modelo aos dados obtidos. Com isso, o K_t empírico passa a ser função da descontinuidade de espessura real, permitindo que a capacidade última seja estimada de forma mais precisa (P_{desc}):

$$P_{desc} = \frac{P}{K_t} \quad 5.24$$

Por fim, a Tabela 5.2 consolida a aplicação prática do fator de concentração de tensões (K_t) calibrado para cada configuração testada na Série 3. Nela são apresentados, para cada conector, os valores das espessuras confinada e exposta, a razão geométrica R , o valor experimental de ruptura ($Q_{lo,u}$), a força teórica calculada pelo modelo de Mohr (P), a razão $P/Q_{lo,u}$, o fator empírico K_t obtido pela regressão exponencial, o valor ajustado da capacidade última (P_{desc}) e o erro. Esse conjunto de informações permite verificar como a variação de espessura na região exposta influencia diretamente o aumento das tensões locais e comprova a eficácia do fator empírico para corrigir o valor teórico, aproximando-o dos resultados

experimentais. Observa-se que a média dos coeficientes de variação obtidos foi de apenas 4,57%, indicando baixa dispersão e boa aderência do modelo aos dados experimentais.

Tabela 5.2 – Aplicação do fator de concentração de tensões (K_t) para ajuste da capacidade última de conectores PERFOFRP da Série 3

Conector	t_{con} [mm]	t_{exp} [mm]	R	$Q_{lo,u}$ [kN]	P kN]	$P/Q_{lo,u}$	K_t	P_{desc}	Erro [%]
S3-0	2	2	1,00	20,25	23,81	1,18	1,26	18,89	6,72
S3-2	2	4	2,00	23,05	47,62	2,07	1,84	25,88	12,27
S3-4	2	6	3,00	27,21	71,43	2,63	2,69	26,59	2,27
S3-6	2	8	4,00	24,63	95,24	3,87	3,92	24,29	1,38
S3-8	2	10	5,00	20,84	119,05	5,71	5,72	20,80	0,20

5.3 Otimização do conector

Os resultados obtidos permitem indicar ajustes geométricos e construtivos que contribuem para melhorar o desempenho dos conectores PERFOFRP. Em relação à espessura, verificou-se que conectores de 4 mm reduzem a possibilidade de instabilidade local observada em chapas de 2 mm e apresentam maior ductilidade. Quanto à disposição dos furos, a configuração com $S_h = 57$ mm e $S_b = 35$ mm mostrou-se mais adequada em termos de ductilidade.

Na região exposta, os ensaios indicaram que o reforço ideal para conectores de 2 mm está entre 2 e 8 mm. Por extrapolação, para conectores de 4 mm recomenda-se reforço em torno de 4 a 8 mm, evitando transições abruptas de espessura. Por fim, recomenda-se produzir o reforço integrado ao processo de laminação em vez de colado posteriormente, a fim de garantir continuidade e reduzir a probabilidade de falhas na interface.

6 CONCLUSÕES

A presente seção reúne as principais conclusões obtidas a partir da análise experimental das quatro séries de conectores formados por placas perfuradas de GFRP (PERFOFRP), com ênfase nos mecanismos resistentes ativados em cada situação, nos padrões de fissuração observados, na resposta força–deslizamento e nos parâmetros mecânicos extraídos dos ensaios. As avaliações foram conduzidas de forma a isolar os efeitos de variáveis geométricas e físicas (como o espaçamento entre furos, a distância à borda, a presença de aderência, o tipo de reforço nos furos e a espessura da região de GFRP na região entre camadas de concreto) permitindo identificar as contribuições individuais de cada fator sobre o desempenho dos conectores.

6.1 Série 1: avaliação do efeito da disposição dos furos no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

A variação do espaçamento entre furos resultou em tendência linear de aumento da extensão das fissuras, com coeficiente angular de 0,61 e $R^2 = 0,96$. A distância dos furos à borda interna também contribuiu para a evolução da fissuração, mas com efeito menos pronunciado, apresentando coeficiente angular de 0,35 e $R^2 = 0,96$. Esses resultados confirmam que a propagação das fissuras é fortemente condicionada pela configuração geométrica adotada.

No comportamento força–deslizamento relativo, verificou-se que a disposição dos furos alterou não apenas o valor máximo de força, mas também o formato das curvas. Conectores com maiores espaçamentos apresentaram respostas mais dúcteis, com pós-pico prolongado e maior capacidade de dissipação, enquanto reduções na distância até a borda interna resultaram em quedas mais abruptas de força. Em situações de espaçamentos menores, as diferentes disposições tenderam a respostas mais semelhantes, embora variações pontuais tenham indicado valores de força ligeiramente superiores em determinadas configurações. O conector sem furos, utilizado como referência, exibiu comportamento estável, porém com menor capacidade de absorção de energia quando comparado aos modelos perfurados.

A análise dos parâmetros mecânicos confirmou o efeito positivo do aumento do espaçamento entre furos sobre a capacidade última ($Q_{lo,u}$), o deslocamento correspondente ($S_{lo,u}$) e a energia dissipada. A energia absorvida (W_{abs}) passou de 372,05 kN·mm, para $S_h = 30$ mm, a 463,56 kN·mm, para $S_h = 57$ mm, com ajuste $R^2 = 1,00$. A energia relativa absorvida (W_{rel}) acompanhou a mesma tendência, crescendo de 9,04 kN·mm/kN para 10,18 kN·mm/kN, com $R^2 = 0,93$. A distância dos furos à borda também produziu efeitos

significativos: W_{abs} variou de 364,02 kN·mm ($S_b = 15$ mm) a 463,86 kN·mm ($S_b = 35$ mm), e W_{rel} aumentou de 7,45 kN·mm/kN para 9,49 kN·mm/kN, ambos com $R^2 = 1,00$.

A avaliação estatística revelou diferenças significativas para a energia absorvida e a extensão das fissuras, mas não identificou distinções relevantes na capacidade última. Esse quadro demonstra que a variação geométrica das perfurações exerce impacto consistente sobre os mecanismos de fissuração e dissipação, ainda que o efeito sobre a resistência máxima seja menos expressivo.

De modo geral, os resultados evidenciam a influência clara das variáveis investigadas no comportamento força–deslocamento e nos parâmetros mecânicos. Ressalta-se, contudo, que os ensaios da Série 1 se limitaram à avaliação de conectores com diâmetro de furo fixo (19 mm), espessura constante (4 mm) e mesmo número de perfurações. Assim, as conclusões aqui obtidas não se estendem automaticamente a conectores com características diferentes das testadas.

6.2 Série 2: avaliação do efeito dos mecanismos resistentes no comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

A avaliação da Série 2 demonstrou que tanto a geometria dos conectores quanto a presença ou ausência de mecanismos resistentes influenciam de forma decisiva seu comportamento estrutural. Os padrões de fissuração variaram conforme as características dos modelos. O conector S2-FRP-EA/RH, que combina eliminação da aderência e reforço com aço nos furos, apresentou fissuras longas e extensas (69,38 cm), enquanto o S2-FRP-RH, com barras de aço mas com aderência preservada (entre o concreto e o GFRP), concentrou fissuras mais curtas e localizadas (34,74 cm). Já os conectores metálicos (S2-A36-EA) e os modelos sem furos (S2- C_{TL}) não apresentaram fissuras estruturais.

Os modelos com eliminação da aderência ou constituídos por aço apresentaram comportamento mais dúctil, como observado nos conectores S2-FRP-EA/RH e S2-A36-EA. Em contrapartida, o S2-FRP-RH sofreu colapso abrupto, sem resistência residual, caracterizando comportamento frágil. A inserção de aço nos furos elevou a capacidade resistente (33,75 kN, aumento de 11%), mas reduziu a deformabilidade. Já a eliminação da aderência aumentou drasticamente o deslizamento (22,60 mm no S2-FRP-EA/RH, incremento de 716%), mas comprometeu a rigidez (1,71 kN/mm, redução de 88%).

O conector S2-A36-EA foi o que mais absorveu energia, com 930,19 kN·mm em termos absolutos e 30,69 kN·mm/kN em termos relativos. O S2-FRP-EA/RH, com maior capacidade deformacional entre os modelos de GFRP, absorveu 454,75 kN·mm e

25,32 kN·mm/kN, respectivamente. Em contraste, o S2-FRP-RH, mais rígido e frágil, teve os menores valores: 159,85 kN·mm e 4,75 kN·mm/kN.

Em termos de ductilidade, apenas o S2-A36-EA atendeu plenamente aos critérios da categoria D3, com $\delta_{ek} = 1,85$ mm e $\delta_{uk} = 27,58$ mm. O S2-FRP-EA/RH também apresentou δ_{uk} elevado (27,07 mm), mas com δ_{ek} acima do limite (8,86 mm), o que resultou na classificação ~D3. O conector de referência S2-FRP foi classificado como D2, enquanto o S2-CTL, dependente apenas do atrito, foi enquadrado como D1. Os resultados indicam que modelos sem aderência, mas com elevada capacidade de deformação, como o S2-FRP-EA/RH, podem apresentar comportamento dúctil, embora não cumpram todos os requisitos normativos. A aderência se confirmou como o mecanismo de maior influência para garantir desempenho equilibrado em termos de resistência, rigidez e ductilidade.

O conjunto dos resultados mostrou que as alterações artificiais foram eficazes para isolar e compreender a contribuição individual de cada mecanismo resistente, permitindo identificar seu papel na resposta global das conexões. O objetivo da etapa foi atendido, com destaque para a importância da aderência e a contribuição complementar dos demais mecanismos. Ressalta-se, entretanto, que as conclusões se restringem às geometrias e condições de ensaio adotadas, não sendo automaticamente aplicáveis a conectores com espessuras, materiais ou configurações diferentes.

6.3 Série 3: avaliação do efeito da espessura do reforço em PRFV na região entre as camadas de concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

A análise da Série 3 indicou que a variação da espessura do enrijecedor na região de GFRP na região entre camadas de concreto influenciou significativamente o comportamento mecânico, os padrões de fissuração e a ductilidade dos conectores, ainda que sem correlação direta com a extensão das fissuras. Os conectores sem reforço (S3-0) e com reforço mais espesso (S3-8) apresentaram desempenho inferior, enquanto o modelo com reforço intermediário de 4 mm (S3-4) alcançou o melhor equilíbrio entre resistência e capacidade de deformação.

A extensão média das fissuras oscilou de 21,11 cm (S3-4) a 34,20 cm (S3-6), sem tendência estatisticamente significativa ($R^2 = 0,07$). Observou-se, no entanto, mudança no local de ruptura com o aumento da espessura: dos modelos sem reforço, em que a ruptura ocorria na região de GFRP na região entre camadas de concreto, para os modelos mais espessos, nos quais a falha migrou para a borda interna ou a interface GFRP/concreto.

A capacidade resistente atingiu seu valor máximo no conector S3-4 ($Q_{lo.u} = 27,21$ kN), seguido por S3-6 (24,63 kN) e S3-2 (23,05 kN). Modelos com espessura muito elevada ou inexistente tiveram as menores resistências, como S3-8 (20,84 kN) e S3-0 (20,25 kN). A regressão polinomial aplicada à força máxima apresentou ótimo ajuste ($R^2 = 0,90$), indicando que reforços excessivos comprometem a resistência estrutural.

O deslocamento na força máxima ($S_{lo.u}$) mostrou comportamento mais instável, variando de 2,20 mm (S3-0) a 3,47 mm (S3-8), com dispersão particularmente elevada neste último ($c_v = 48\%$). A rigidez inicial (K_f) aumentou até o modelo com reforço de 4 mm (18,32 kN/mm) e voltou a cair com maiores espessuras, mostrando que espessuras moderadas de reforço, tendem a aumentar a rigidez inicial.

Quanto à energia absorvida, os melhores desempenhos ocorreram nos conectores S3-4 (253,41 kN·mm) e S3-2 (246,54 kN·mm), com energia relativa de 9,32 e 10,72 kN·mm/kN, respectivamente. Em contraste, os modelos S3-6 e S3-8 registraram quedas significativas na dissipação de energia, sendo este último o pior da série (113,23 kN·mm; 5,42 kN·mm/kN). O modelo sem reforço (S3-0) apresentou resultados igualmente baixos.

A avaliação da ductilidade mostrou que apenas o modelo S3-2 foi classificado como D2, com deslocamento final (δ_{uk}) de 6,23 mm. Os demais conectores foram enquadrados como D1, com valores inferiores a 3 mm, incluindo o S3-4 (2,69 mm) e o S3-8 (2,01 mm).

Em síntese, a espessura de 4 mm mostrou-se a mais eficiente, promovendo equilíbrio entre resistência, rigidez e dissipação de energia. Reforços mais espessos aumentaram a rigidez local, mas comprometeram a ductilidade e a estabilidade no pós-pico, resultando em comportamento mais frágil. Os resultados confirmam a influência decisiva da espessura do reforço em PRFV sobre os mecanismos resistentes e o objetivo da etapa foi atendido. Contudo, as conclusões se restringem às espessuras e geometrias avaliadas, não abrangendo outras configurações ou condições de ensaio, o que limita a extrapolação direta dos resultados.

6.4 Série 4: avaliação do efeito do número e do diâmetro dos furos na região de ancoragem em concreto sobre o comportamento ao cisalhamento das conexões com conectores do tipo PERFOFRP

A análise da Série 4 mostrou que o número de furos foi o parâmetro geométrico com maior influência tanto na propagação das fissuras quanto no desempenho mecânico dos conectores. Conectores com mais furos, como o S4-19-3 (três furos de 19 mm), apresentaram fissuras mais extensas, com média de 56,27 cm, enquanto modelos com apenas um furo, como

o S4-19-1, tiveram fissuras significativamente menores, com média de 23,54 cm. A correlação entre o número de furos e a extensão das fissuras foi perfeita ($R^2 = 1,00$), ao passo que outros parâmetros geométricos, como o diâmetro dos furos e a área perfurada, apresentaram correlações muito inferiores ($R^2 < 0,50$), indicando que a quantidade de furos é o principal fator de controle da fissuração.

Em termos de desempenho mecânico, os conectores com um ou dois furos apresentaram comportamento mais equilibrado. O modelo S4-19-1 atingiu $Q_{lo,u}$ de 24,39 kN, com K_f de 13,84 kN/mm e $S_{lo,u}$ de 2,86 mm, enquanto o S4-19-2 registrou $Q_{lo,u}$ de 22,50 kN, K_f de 13,63 kN/mm e $S_{lo,u}$ de 2,85 mm. Já o conector com três furos e maior força máxima da série, S4-19-3 ($Q_{lo,u} = 28,28$ kN), teve deslizamento reduzido ($S_{lo,u} = 2,33$ mm) e K_f de 14,60 kN/mm. Os demais modelos, S4-16-3 e S4-13-3, apresentaram valores intermediários, com $Q_{lo,u}$ de 24,34 kN e 25,27 kN, K_f de 15,03 kN/mm e 15,92 kN/mm, e $S_{lo,u}$ de 2,23 mm e 2,23 mm, respectivamente. Esses dados indicam que o aumento no número de furos pode elevar a força máxima, mas tende a reduzir a capacidade de deslizamento e afetar a ductilidade do sistema.

Por outro lado, na análise da energia absorvida, o conector com um único furo (S4-19-1) se destacou como o mais eficiente, com valores de 322,12 kN·mm para a energia absoluta (W_{abs}) e 12,45 kN·mm/kN para a energia relativa (W_{rel}). À medida que o número de furos aumentou, a energia absorvida caiu de forma consistente, com correlações significativas tanto para W_{abs} ($R^2 = 0,77$) quanto para W_{rel} ($R^2 = 0,96$). No caso do S4-19-3, por exemplo, W_{rel} foi de apenas 8,98 kN·mm/kN, evidenciando que a presença de múltiplos furos compromete a capacidade de dissipação de energia.

Quanto à ductilidade, apenas os conectores S4-19-1 e S4-19-2 atingiram a classificação D3, com deslocamentos finais (δ_{uk}) superiores a 10 mm. Os conectores com três furos (S4-19-3, S4-16-3 e S4-13-3) foram classificados como D2, com δ_{uk} entre 6,63 mm e 8,32 mm. Mesmo o S4-19-3, que alcançou a maior força máxima da série ($P_e = 28,28$ kN), não atingiu o deslizamento necessário para a categoria D3, reforçando que a ductilidade está mais associada à geometria do conector do que à sua resistência máxima.

A modelagem das curvas força–deslizamento reforçou essas conclusões. Conectores com menos furos mantiveram maiores níveis de força no regime plástico e apresentaram maior capacidade de deformação após o pico. Já a rigidez inicial foi semelhante entre todas as configurações, o que indica que as alterações geométricas influenciaram predominantemente o comportamento pós-pico, sem afetar significativamente a resposta elástica inicial.

Os achados experimentais demonstraram que a variação geométrica exerceu influência clara sobre o comportamento força–deslizamento e os parâmetros mecânicos dos conectores, permitindo compreender os efeitos da alteração no diâmetro e na quantidade de furos. O objetivo da etapa foi atendido, ainda que se tenha constatado que o número de perfurações teve impacto mais expressivo do que o diâmetro isolado. Ressalta-se, porém, que os resultados estão limitados às geometrias e dimensões testadas, não abrangendo outras combinações de diâmetro, número ou disposição de furos, o que recomenda cautela na extrapolação para diferentes configurações.

6.5 Proposta de um modelo analítico da capacidade resistente de conexões

PERFOFRP

Os resultados apresentados demonstram que é possível estimar de forma coerente a capacidade última de conectores do tipo PERFOFRP por meio de modelos analíticos fundamentados em parâmetros geométricos, propriedades mecânicas dos materiais e validação experimental. Para cada mecanismo resistente (cisalhamento do concreto nos furos, ruptura do GFRP na região entre camadas de concreto ou confinado e perda de aderência na interface GFRP–concreto) foram propostas equações de cálculo, fatores de ajuste quando necessário e valores de referência obtidos em ensaios.

A análise da ruptura do concreto nos furos evidenciou que o mecanismo resistente associado aos pinos de concreto apresenta comportamento consistente, com valores experimentais médios da ordem de 22,60 kN e tensão de cisalhamento equivalente a 26,40 MPa, cerca de 68% de f_{ck} . Embora exista uma reserva plástica que pode elevar a capacidade até 30,25 kN, essa contribuição adicional depende de variáveis de difícil mensuração e, portanto, não foi incorporada ao modelo proposto. A aplicação adaptada da equação originalmente desenvolvida para conectores do tipo PERFOBOND, mostrou-se adequada para representar esse mecanismo quando restringida ao termo relativo aos pinos de concreto, resultando em uma estimativa de 22,31 kN. Esse valor corresponde a uma diferença de aproximadamente 15,5% em relação ao resultado experimental, o que permite considerar o modelo obtido como uma aproximação satisfatória para o dimensionamento de conectores PERFOFRP em situações análogas.

Na região de GFRP entre camadas de concreto, a aplicação do Critério de Mohr resultou em valores estimados de 23,8 kN para um conector com espessura de 2 mm, altura de 200 mm e comprimento de 50 mm, próximo ao valor médio experimental de 20,5 kN, diferença de + 16%. Para o GFRP confinado, o modelo baseado na área líquida vertical com desconto de

três furos de 19,05 mm apresentou valor calculado de 46,30 kN, enquanto a média experimental foi de 43,60 kN, resultando em erro médio absoluto de apenas 7,0%.

A aplicação do fator empírico de concentração de tensões (K_t) para situações com variação de espessura mostrou-se eficaz, com resultados ajustados que apresentaram coeficiente de variação médio de apenas 4,57% em relação aos ensaios de cisalhamento duplo. Isso demonstra que a variação da espessura exposta pode alterar significativamente a concentração de tensões, mas pode ser adequadamente corrigida com o fator proposto.

Os modelos desenvolvidos fornecem uma base técnica sólida para estimativas no dimensionamento de conectores PERFOFRP em painéis sanduíche, demonstrando capacidade de representar os principais mecanismos de ruptura e de fornecer previsões consistentes, o que confirma que a finalidade desta etapa foi atendida. Contudo, suas aplicações estão limitadas às condições avaliadas, especialmente quanto à espessura, diâmetros e geometrias específicas dos furos, além de ensaios de curto prazo. Dessa forma, os resultados devem ser vistos como referência inicial, passível de ajustes e ampliações conforme novas investigações experimentais e numéricas sejam desenvolvidas.

6.6 Sugestões para trabalhos futuros

A presente pesquisa avançou no entendimento do comportamento de conectores do tipo PERFOFRP submetidos a esforços de cisalhamento, mas abre espaço para novas investigações que possam ampliar e aprofundar os resultados alcançados.

Uma primeira vertente consiste na expansão da base experimental, incluindo a avaliação de conectores com diferentes espessuras de PRFV, variações no diâmetro e na quantidade de furos, além de ensaios de longa duração que permitam analisar os efeitos de fluência, fadiga e variações térmicas no desempenho global dos painéis sanduíche. Ensaios em escala real, aplicados a painéis submetidos a ações combinadas de cisalhamento, flexão e carga axial, também se mostram relevantes para validar o comportamento observado em corpos de prova reduzidos.

Outra linha de continuidade diz respeito à melhoria da formulação analítica. Os modelos propostos podem ser refinados por meio da calibração de coeficientes empíricos com base em bancos de dados mais amplos, bem como pela introdução de fatores de segurança que considerem a variabilidade inerente às propriedades do PRFV e do concreto. Além disso, análises paramétricas poderão contribuir para estabelecer limites de aplicabilidade mais claros e para consolidar recomendações práticas de dimensionamento.

Por fim, sugere-se o desenvolvimento de modelagens numéricas, com uso de métodos de elementos finitos que representem de forma mais detalhada a interação entre concreto, PRFV e material de preenchimento dos furos. A implementação de modelos constitutivos específicos para o PRFV, capazes de captar o comportamento anisotrópico e as não linearidades progressivas até a ruptura, pode contribuir de maneira significativa para o entendimento dos mecanismos resistentes e para a previsão do desempenho estrutural em condições variadas de carregamento.

7 BIBLIOGRAFIA

ABNT. *ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos*. . Rio de Janeiro: 2018.

ABNT. *ABNT NBR 7222 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. . Rio de Janeiro: 2011.

ABNT. *ABNT NBR 8522-1:2021 - Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão*. . Rio de Janeiro: 2021.

ABNT. *NBR 8800:2024 — Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios* Rio de Janeiro: 2024.

AL-HOMOUD, Mohammad S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, v. 40, n. 3, p. 353–366, 1 mar. 2005. Acesso em: 14 ago. 2024.

AL-RUBAYE, Salam *et al.* Evaluating Elastic Behavior for Partially Composite Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *PCI Journal*, v. 63, n. 5, 2018. Acesso em: 11 ago. 2024.

AMRAN, Y H Mugahed *et al.* Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 107, p. 307–320, mar. 2016.

ARAÚJO, Wallas Borges. *Comportamento Experimental de Conectores de Cisalhamento do Tipo PERFOFRP Reforçados com Fibras de Curauá*. 2023. Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

ASTM. *ASTM D3039/D3039M-17 - Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. West Conshohocken, PA, USA: 2017.

BARROS, Joaquim; PEREIRA, Eduardo; SANTOS, Simão. Lightweight Panels of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 19, n. 4, p. 295–304, 1 abr. 2007. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282007%2919%3A4%28295%29>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

BENAYOUNE, A. *et al.* Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich composite panel - Experimental and theoretical investigations. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 4, p. 580–592, 2008.

BENAYOUNE, A *et al.* Response of pre-cast reinforced composite sandwich panels to axial loading. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 21, n. 3, SI, p. 677–685, mar. 2007.

BENAYOUNE, A *et al.* Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 20, n. 9, p. 713–724, nov. 2006.

BUSH, Thomas D.; STINE, Gregory L. Flexural Behavior of Composite Precast Concrete Sandwich Panels With Continuous Truss Connectors. *PCI Journal*, v. 39, n. 2, p. 112–121, 1994.

BUSH, Thomas D.; WU, Zhiqi. Flexural analysis of prestressed concrete sandwich panels with truss connectors. *PCI Journal*, v. 43, n. 5, p. 76–83, 1998.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. Wiley, 2021.

CANADIAN PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. *Saginaw Gardens Apartment*.

CHEN, An *et al.* Experimental investigation and finite element analysis of flexural behavior of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors. *Engineering Structures*, v. 98, p. 95–108, 2015.

CHO, Jeong Rae *et al.* Pull-out test and discrete spring model of fibre-reinforced polymer perfobond rib shear connector. <https://doi.org/10.1139/cjce-2011-0573>, v. 39, n. 12, p. 1311–1320, dez. 2012. Disponível em: <<https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjce-2011-0573>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

CHOI, Ki Bong *et al.* In-plane shear behavior of insulated precast concrete sandwich panels reinforced with corrugated GFRP shear connectors. *Composites Part B: Engineering*, v. 79, p. 419–429, 2015.

CHOI, Wonchang; JANG, Seok Joon; YUN, Hyun Do. Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors. *Composites Part B: Engineering*, v. 157, n. June 2018, p. 36–42, 2019.

DING, Ran *et al.* Experimental and theoretical study on flexural behaviour of a new UHPC sandwich slab. *Engineering Structures*, v. 267, 15 set. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

DIÓGENES, Hidelbrando José Farkat. *Análise numérica e experimental de ligações por aderência aço–concreto aplicada em estruturas mistas*. 2013. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2013.

EINEA, Amin *et al.* A New Structurally and Thermally Efficient Precast Sandwich Panel System. *PCI Journal*, v. 39, n. 4, p. 90–101, 1994.

EINEA, Amin *et al.* State-of-the-art of Precast Concrete Sandwich Panels. *PCI Journal*, v. 36, n. 6, p. 78–92, 1991.

EKENEL, Mahmut. Testing and Acceptance Criteria for Fiber-Reinforced Composite Grid Connectors Used in Concrete Sandwich Panels. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, v. 26, n. 6, jun. 2014.

EUROCODE. *prEN 1994-1-1 - Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. 2024.

FARIA OLIVEIRA, Thainá *et al.* Precast concrete sandwich panels (PCSP): An analytical review and evaluation of CO2 equivalent. *Construction and Building Materials*, v. 358, p. 129424, 5 dez. 2022. Acesso em: 16 set. 2024.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *Precast insulated sandwich panels : state-of-the-art report*. . Lausanne, Switzerland: Fédération internationale du béton, 2017. . Acesso em: 10 set. 2024.

FRANKL, Bernard A *et al.* Behavior of precast, prestressed concrete sandwich wall panels reinforced with CFRP shear grid. *PCI JOURNAL*, p. 42–54, 2011.

GARA, Fabrizio *et al.* Experimental behaviour and numerical analysis of floor sandwich panels. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 36, p. 258–269, mar. 2012a.

GARA, Fabrizio *et al.* Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 37, p. 193–204, 2012b.

GARHWAL, Anil; SHARMA, Shruti; ROY, Danie. Performance of Expanded Polystyrene (EPS) sandwiched concrete panels subjected to accelerated corrosion. *Structures*, v. 43, p. 1057–1072, 1 set. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

GOMBEDA, Matthew J *et al.* Simplified model for partially-composite precast concrete insulated wall panels subjected to lateral loading. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 138, p. 367–380, 2017.

HAMED, Ehab; NEGRU, Daniel; YALDA, Richard. Structural Performance of Precast Concrete Sandwich Panels Made with FRP Vierendeel Truss–Like Connectors. *Journal of Composites for Construction*, v. 26, n. 3, jun. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

HASSAN, Tarek K; RIZKALLA, Sami H. Analysis and design guidelines of precast, prestressed concrete, composite load-bearing sandwich wall panels reinforced with CFRP grid. *PCI JOURNAL*, p. 147–162, 2010.

HE, Zhizhou *et al.* Experimental and Numerical Investigation of Novel I-Shaped GFRP Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION*, v. 24, n. 5, 2020.

HODICKY, K *et al.* Experimental and Numerical Investigation of the FRP Shear Mechanism for Concrete Sandwich Panels. *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION*, v. 19, n. 5, 2015.

HOPKINS, Paul M.; NORRIS, Thomas; CHEN, An. Creep behavior of insulated concrete sandwich panels with fiber-reinforced polymer shear connectors. *Composite Structures*, v. 172, p. 137–146, 15 jul. 2017.

HOU, Hetao *et al.* Flexural behavior of precast insulated sandwich wall panels: Full-scale tests and design implications. *Engineering Structures*, v. 180, n. December 2018, p. 750–761, 2019.

HUANG, Jun Qi; DAI, Jian Guo. Direct shear tests of glass fiber reinforced polymer connectors for use in precast concrete sandwich panels. *Composite Structures*, v. 207, n. September 2018, p. 136–147, 2019.

HUANG, Junqi *et al.* Experimental study on precast concrete sandwich panel with cross-shaped GFRP connectors. *Magazine of Concrete Research*, v. 72, n. 3, p. 149–162, 2020.

HUANG, Qian; HAMED, Ehab; GILBERT, R. Ian. Behavior of Concrete Sandwich Panels under Eccentric Axial Compression—Testing and Finite Element Analysis. *ACI Structural Journal*, v. 117, n. 3, p. 235–247, 1 maio 2020a. Acesso em: 11 ago. 2024.

HUANG, Qian; HAMED, Ehab; IAN GILBERT, R. Experimental and numerical investigation of the creep response of precast concrete sandwich panels. *Structures*, v. 28, p. 2096–2110, 1 dez. 2020.

HYUN-DO, Yun; SEOK-JOON, Jang; YOUNG-CHAN, You. Direct Shear Responses of Insulated Concrete Sandwich Panels with GFRP Shear Connectors. *Applied*

Mechanics and Materials, v. 204–208, p. 803–806, 2012. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMM.204-208.803>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

INSEL, Emre *et al.* Carbon Fiber Connectors for Concrete Sandwich Panels. *Concrete International*, v. 28, n. 10, p. 33–38, 1 out. 2006. Acesso em: 12 ago. 2024.

ISO. *ISO 15630-1:2019 - Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, rods and wire*. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2019.

KAZEM, Hamid *et al.* Durability and long term behavior of FRP/foam shear transfer mechanism for concrete sandwich panels. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 98, p. 722–734, nov. 2015.

KIM, Jun Hee; YOU, Young Chan. Composite behavior of a novel insulated concrete sandwich wall panel reinforced with GFRP shear grids: Effects of insulation types. *Materials*, v. 8, n. 3, p. 899–913, 2015.

KUMAR, Sushil *et al.* Axial-flexural behavior of FRP grid-reinforced geopolymer concrete sandwich wall panels enabled with FRP connectors. *Journal of Building Engineering*, v. 47, 15 abr. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

KUMAR, Sushil *et al.* Structural behavior of FRP grid reinforced geopolymer concrete sandwich wall panels subjected to concentric axial loading. *Composite Structures*, v. 270, 15 ago. 2021. Acesso em: 11 ago. 2024.

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim; VALENTE, Isabel B.; *et al.* Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part I: Conception and pull-out tests. *Composite Structures*, v. 105, p. 446–459, 2013.

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim; AZENHA, Miguel; *et al.* Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. Part II: Evaluation of mechanical behaviour. *Composite Structures*, v. 105, p. 460–470, 2013a.

LAMEIRAS, Rodrigo; VALENTE, Isabel B; BARROS, Joaquim A O; AZENHA, Miguel; GONCALVES, Claudia. Pull-out behaviour of Glass-Fibre Reinforced Polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part I: Experimental program. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 162, p. 155–169, 2018.

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim A.O.; *et al.* Pull-out behaviour of glass-fibre reinforced polymer perforated plate connectors embedded in concrete. Part II: Prediction of load carrying capacity. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 142–164, abr. 2018.

LAMEIRAS, Rodrigo *et al.* Seismic behaviour of precast sandwich wall panels of steel fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 237, jun. 2021.

LAMEIRAS, Rodrigo; BARROS, Joaquim A O; AZENHA, Miguel. Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC). *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES*, v. 59, p. 60–76, 2015.

LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. *Sandwich structural panels comprising thin-walled SFRSCC and GFRP connectors: from material features to structural behaviour*. 2015. 446 f. Guimarães, 2015.

LEE, Byoung-Jun; PESSIKI, Stephen. Experimental evaluation of precast, prestressed concrete, three-wythe sandwich wall panels. *PCI JOURNAL*, v. 53, n. 2, p. 95–115, 2008a.

LEE, Byoung-Jun; PESSIKI, Stephen. Revised zone method R-value calculation for precast concrete sandwich panels containing metal wythe connectors. *PCI JOURNAL*, v. 53, n. 5, p. 86–100, 2008b.

LEE, Byoung-Jun; PESSIKI, Stephen. Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels. *ENERGY AND BUILDINGS*, v. 38, n. 8, p. 1006–1014, 2006.

LIU, Xia *et al.* The Shear Behavior of Insulated Precast Concrete Sandwich Panels Reinforced with BFRP. *Buildings*, v. 12, n. 9, 1 set. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

LOU, Xiaohang *et al.* Shear behavior of stainless-steel plate connectors for insulated precast concrete sandwich panels. *Structures*, v. 44, p. 1046–1056, 1 out. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

M. K. NAFADI *et al.* 20-0031_Nafadi_SO21. *PCI Journal*, v. 66, n. 5, p. 40–57, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.15554/pcij66.5-01>>. Acesso em: 24 set. 2025.

MACCALL, Calvin W. Thermal Properties of Sandwich Panels. *Concrete Internacional*, v. 7, n. 1, p. 35–41, 1985.

MAXIMOS, Hany N. *et al.* Behavior and Design of Composite Precast Prestressed Concrete Sandwich Panels with NU-Tie. n. March, p. 28, 2007.

MOHAMAD, Noridah *et al.* Testing of Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel with Single and Double Symmetrical Shear Truss Connectors under Eccentric Loading. *Advanced Materials Research*, v. 335–336, p. 1107–1116, 2011. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AMR.335-336.1107>>. Acesso em: 4 set. 2024.

MUGAHED AMRAN, Y. H. *et al.* Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review. *Structures*, v. 27, p. 1358–1379, 1 out. 2020. Acesso em: 11 ago. 2024.

NAITO, Clay *et al.* Performance and Characterization of Shear Ties for Use in Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING-ASCE*, v. 138, n. 1, p. 52–61, jan. 2012.

OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U. Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors. *Computers and Structures*, v. 62, n. 4, p. 617–624, 1997.

OH, Tae Sik; JANG, Seok Joon; YUN, Hyun Do. Shear reinforcing influence of GFRP shear connectors in the concrete sandwich wall panel (CSWP) for exterior envelopes of buildings. *Advanced Materials Research*, v. 658, p. 38–41, 2013.

O’HEGARTY, Richard *et al.* Development of thin precast concrete sandwich panels: Challenges and outcomes. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 267, jan. 2021.

O’HEGARTY, Richard *et al.* Thermal investigation of thin precast concrete sandwich panels. *Journal of Building Engineering*, v. 27, p. 100937, 1 jan. 2020. Acesso em: 10 set. 2024.

O’HEGARTY, Richard; KINNANE, Oliver. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. *Construction and Building Materials*, v. 233, p. 117145, 2020.

O’HEGARTY, Richard; KINNANE, Oliver; MCCORMACK, Sarah J. Concrete solar collectors for façade integration: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy*, v. 206, p. 1040–1061, 2017a. Acesso em: 11 ago. 2024.

O’HEGARTY, Richard; KINNANE, Oliver; MCCORMACK, Sarah J. Parametric investigation of concrete solar collectors for façade integration. *Solar Energy*, v. 153, p. 396–413, 1 set. 2017b. Acesso em: 10 set. 2024.

PAHN, M.; HANZ, F. Influences of the production process on the load-deflection behaviour of three-layered sandwich panels with GFRP-connectors. *Architecture Civil Engineering Environment*, v. Vol. 5, n. 1, p. 37–46, 2012. Acesso em: 13 ago. 2024.

PALERMO, Michele *et al.* Preliminary interpretation of shaking-table response of a full-scale 3-storey building composed of thin reinforced concrete sandwich walls. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 76, p. 75–89, 2014.

PAN, Peng *et al.* Experimental investigation of C-shaped glass-fiber-reinforced polymer connectors for sandwich insulation wall panels. *Engineering Structures*, v. 250, 1 jan. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

PANTELIDES, Chris P; SURAPANENI, Rajeev; REAVELEY, Lawrence D. Structural performance of hybrid GFRP/steel concrete sandwich panels. *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION*, v. 12, n. 5, p. 570–576, 2008.

PCI COMMITTEE REPORT. State of the art of precast/prestressed concrete sandwich wall panels. *PCI Journal*, v. 56, n. 2, p. 131–176, 2011.

PCI COMMITTEE REPORT. State-of-the-art of precast/prestressed sandwich wall panels. *PCI JOURNAL*, v. 42, n. 3, p. 32–49, 1997.

PEREIRA, Eduardo N. B.; BARROS, Joaquim A. O.; CAMÕES, Aires. Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete: Experimental Research and Numerical Simulation. *Journal of Structural Engineering*, v. 134, n. 8, p. 1310–1321, 1 ago. 2008. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282008%29134%3A8%281310%29%29>>. Acesso em: 11 ago. 2024.

PESSIKI, S; MLYNARCZYK, A. Experimental evaluation of the composite behavior of precast concrete sandwich wall panels. *PCI JOURNAL*, v. 48, n. 2, p. 54+, 2003.

RICCI, Ilaria *et al.* Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls. *ENGINEERING STRUCTURES*, v. 54, p. 131–149, 2013.

RIZKALLA, S. H.; HASSAN, T. K.; LUCIER, G. FRP Shear Transfer Mechanism for Precast, Prestressed Concrete Sandwich Load-Bearing Panels. *Special Publication*, v. 265, n. 265 SP, p. 603–626, 1 out. 2009. Acesso em: 8 ago. 2024.

SAH, Tilak Prasad *et al.* Prefabricated concrete sandwich and other lightweight wall panels for sustainable building construction: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, v. 89, p. 109391, 15 jul. 2024. Acesso em: 11 ago. 2024.

SALMON, David *et al.* Full Scale Testing of Precast Concrete Sandwich Panels. *ACI Structural Journal*, v. 94, n. 4, p. 354–362, 1997.

SALMON, David C.; EINEA, Amin. Partially Composite Sandwich Panel Deflections. *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 4, p. 778–783, 1 abr. 1995. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%281995%29121%3A4%28778%29>. Acesso em: 3 set. 2024.

SILVA, John Kennedy Fonsêca. *Avaliação experimental sobre o comportamento mecânicos de conectores de cisalhamento do tipo PERFOFRP em paredes pré-moldadas de concreto com isolamento incorporado*. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade de Brasília, 2020.

SILVA, John Kennedy Fonsêca; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Experimental Analysis of the Mechanical Behavior of Shear Connectors for Precast Sandwich Wall Panels When Subjected to the Push-Out Tests. *Buildings*, v. 14, n. 10, 1 out. 2024.

SILVA, John Kennedy Fonsêca; RIBEIRO, Renan Rocha; LAMEIRAS, Rodrigo de Melo. Evaluation of production quality and mechanical behavior of low-cost shear connectors manufactured with perforated GFRP plates. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 3, p. 1–21, 2021.

SURYANI, S; MOHAMAD, N. Structural Behaviour of Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel under Axial Load: An Overview. *International Journal of Integrated Engineering-Special Issue on ICONCEES*, v. 4, n. 3, p. 47–52, 2012. Acesso em: 4 set. 2024.

SYNDERGAARD, Parker *et al.* Comparing Testing Methods of Partially Composite Sandwich Wall Panel Glass Fiber–Reinforced Polymer Connectors. *Journal of Composites for Construction*, v. 26, n. 1, fev. 2022. Acesso em: 11 ago. 2024.

TOMLINSON, Douglas; FAM, Amir. Analysis and Parametric Study of Partially Composite Precast Concrete Sandwich Panels under Axial Loads. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, v. 142, n. 10, 2016.

TOMLINSON, Douglas; FAM, Amir. Flexural behavior of precast concrete sandwich wall panels with basalt FRP and steel reinforcement. *PCI JOURNAL*, p. 51–71, 2015.

TOMLINSON, Douglas G.; TEIXEIRA, Nathan; FAM, Amir. New Shear Connector Design for Insulated Concrete Sandwich Panels Using Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Journal of Composites for Construction*, v. 20, n. 4, p. 1–13, 2016.

VAN TITTELBOOM, Kim *et al.* Self-repair of thermal cracks in concrete sandwich panels. *Structural Concrete*, v. 16, n. 2, p. 273–288, 1 jun. 2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/suco.201400055>>. Acesso em: 13 ago. 2024.

WANG, Yi *et al.* Flexural Behavior of Insulated Concrete Sandwich Panels using FRP-Jacketed Steel-Composite Connectors. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2022, n. 1, p. 6160841, 1 jan. 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2022/6160841>>. Acesso em: 20 set. 2024.

WERKEMA, Maria Cristina Caratino; DRUMOND, Fatima Brandt; AGUIAR, Silvio. *Análise de variância: comparação de várias situações*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1996. v. 6.

WILLIAMS PORTAL, Natalie *et al.* Bending behaviour of novel Textile Reinforced Concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements. *Composite Structures*, v. 177, p. 104–118, 1 out. 2017. Acesso em: 11 ago. 2024.

WOLTMAN, Greg; TOMLINSON, Douglas; FAM, Amir. Investigation of various GFRP shear connectors for insulated precast concrete sandwich wall panels. *Journal of Composites for Construction*, v. 17, n. 5, p. 711–721, 2013.

YANG, Yanmin *et al.* Study on impact resistance of precast light-weight concrete sandwich panels. *Structures*, v. 47, p. 966–975, 1 jan. 2023. Acesso em: 20 set. 2024.

APÊNDICE A: RESULTADOS COMPLETOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O presente Capítulo 10, intitulado “Apêndice A: resultados completos de caracterização dos materiais” apresenta os dados detalhados dos ensaios realizados para a caracterização dos materiais utilizados nas séries experimentais deste trabalho. Este apêndice inclui resultados individuais de cada corpo de prova para parâmetros como resistência à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade, entre outros. Esses resultados complementam as informações apresentadas nas tabelas principais do estudo.

Concreto

O tópico 10.1, "Concreto," apresenta os resultados completos dos ensaios de caracterização do concreto utilizado nas séries experimentais deste estudo. Os dados incluem medições detalhadas de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade para cada corpo de prova. Esses resultados foram obtidos conforme as normas ABNT NBR 5739 (2018), ABNT NBR 7222 (2021) e ABNT NBR 8522 (2021), que orientam os procedimentos para ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, respectivamente.

A Tabela A.1 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4. Os dados mostram a resistência individual de cada corpo de prova, assim como os valores médios, desvios-padrão e erros percentuais de cada série.

Tabela A.1 – Resultados da resistência à compressão dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Série	CP	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
1	1	42,59	43,25	0,65	1,49
	2	43,88			
	3	43,28			
2, 3 e 4	1	35,78	38,57	2,93	7,59
	2	38,30			
	3	41,62			

A Tabela A.2 fornece um detalhamento dos ensaios de resistência à tração realizados nos concretos das Séries 1, 2, 3 e 4. Os dados incluem as medições de resistência de cada corpo de prova, além dos valores médios, desvios-padrão e percentuais de erro obtidos para cada série.

Tabela A.2 – Resultados da resistência à tração dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Série	Amostra	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
1	1	4,38	4,60	0,26	5,58
	2	4,56			
	3	4,88			
2, 3 e 4	1	4,75	4,69	0,21	4,51
	2	4,87			
	3	4,46			

A Tabela A.3 detalha os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade realizados nos concretos das Séries 1, 2, 3 e 4. Nessa tabela, encontram-se as medições individuais de cada corpo de prova, acompanhadas dos valores médios, desvios-padrão e percentuais de erro para cada série.

Tabela A.3 – Resultados do módulo de elasticidade dos concretos utilizados nas Séries 1, 2, 3 e 4.

Série	CP	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
1	1	31,46	31,37	1,63	5,20
	2	29,70			
	3	32,96			
2, 3 e 4	1	26,21	26,71	0,44	1,66
	2	27,06			
	3	26,86			

Os resultados obtidos para os concretos das Séries 1, 2, 3 e 4 revelam um comportamento uniforme e satisfatório em relação às propriedades mecânicas avaliadas. A Tabela A.1 apresenta os valores de resistência à compressão, com resultados que demonstram boa consistência entre as séries. Já a Tabela A.2 detalha a resistência à tração, confirmando a estabilidade do material sob esforços de tração. A Tabela A.3 traz os dados referentes ao módulo de elasticidade, indicando a rigidez do concreto de forma consistente entre as diferentes séries. Esses resultados, analisados em conjunto, apontam para a qualidade e a homogeneidade do concreto empregado, reforçando sua adequação para as aplicações estruturais propostas.

GFRP

O item 10.2, “GFRP,” reúne os resultados completos dos ensaios de caracterização dos GFRPs empregados nas séries experimentais deste estudo. Os ensaios focaram na obtenção de propriedades mecânicas fundamentais, como resistência à tração e módulo de elasticidade,

que impactam diretamente o desempenho dos conectores de cisalhamento em painéis sanduíche. Estão incluídos os resultados individuais de cada corpo de prova.

A Tabela A.4 apresenta os resultados detalhados da resistência à tração do GFRP utilizado na Série 1, incluindo as medições de cada corpo de prova testado. A resistência média registrada foi de 203,8 MPa, com um desvio-padrão de 20,1 MPa. O erro percentual calculado foi de 9,9%, indicando variações entre os corpos de prova que podem resultar de pequenas diferenças na fabricação ou no alinhamento do material durante os ensaios.

Tabela A.4 – Resultados da resistência à tração do GFRP utilizado na Série 1.

CP	Resistência à tração [MPa]
1	203,0
2	203,9
3	167,7
4	183,6
5	208,3
6	175,8
7	222,4
8	234,5
9	206,3
10	220,8
11	245,6
12	185,0
13	210,7
14	217,0
15	195,9
16	177,2
17	209,4
18	210,4
19	198,9
20	224,4
21	203,0
22	208,7
23	226,0
24	175,1
25	199,2
26	213,8
27	229,6
28	214,8
29	208,4
30	168,4
31	168,3
32	204,5

CP	Resistência à tração [MPa]
Média [MPa]	203,8
Desvio-padrão [MPa]	20,1
Erro [%]	9,9

A Tabela A.5 mostra os resultados de resistência à tração do GFRP utilizado nas Séries 2, 3 e 4, incluindo os valores individuais de cada corpo de prova. A média de resistência registrada é de 195,4 MPa, com um desvio-padrão de 24,2 MPa, o que evidencia certa dispersão nos resultados. O erro percentual para essa série é de 12,4%, sugerindo uma variação moderada entre as amostras.

Tabela A.5 – Resultados da resistência à tração do GFRP utilizado nas Séries 2, 3 e 4.

CP	Resistência à tração [MPa]
1	175,1
2	175,1
3	196,8
4	172,4
5	194,5
6	172,3
7	226,0
8	235,1
9	222,8
10	184,4
Média [MPa]	195,4
Desvio-padrão [MPa]	24,2
Erro [%]	12,4

A Tabela A.6 apresenta os resultados do módulo de elasticidade do GFRP utilizado na Série 1, incluindo as medições individuais de cada corpo de prova. A média obtida foi de 14.898,2 MPa, com um desvio-padrão de 973,7 MPa, revelando certa dispersão entre os valores. O erro percentual foi calculado em 6,5%.

Tabela A.6 – Resultados do módulo de elasticidade do GFRP utilizado na Série 1.

CP	Módulo de elasticidade [MPa]
1	14.846
2	15.788
3	13.480

4	14.019
5	13.834
6	14.112
7	15.203
8	15.648
9	14.593
10	16.864
11	15.263
12	15.418
13	14.869
14	16.707
15	14.886
16	13.703
17	14.095
18	15.546
19	15.196
20	16.682
21	15.427
22	14.426
23	15.789
24	13.480
25	14.716
26	15.146
27	16.047
28	15.598
29	13.684
30	13.560
31	13.808
32	14.308
Média [MPa]	14.898,2
Desvio-padrão [MPa]	973,7
Erro [%]	6,5

A Figura A.1 apresenta o comportamento força versus deformação do GFRP utilizado na Série 1, com uma segmentação em quatro conjuntos — (a) CPs 1 a 8, (b) CPs 9 a 16, (c) CPs 17 a 24 e (d) CPs 25 a 32 — realizada apenas para facilitar a visualização dos dados. Todos os corpos de prova exibiram praticamente o mesmo comportamento, indicando uma resposta uniforme do material em termos de resistência e deformação.

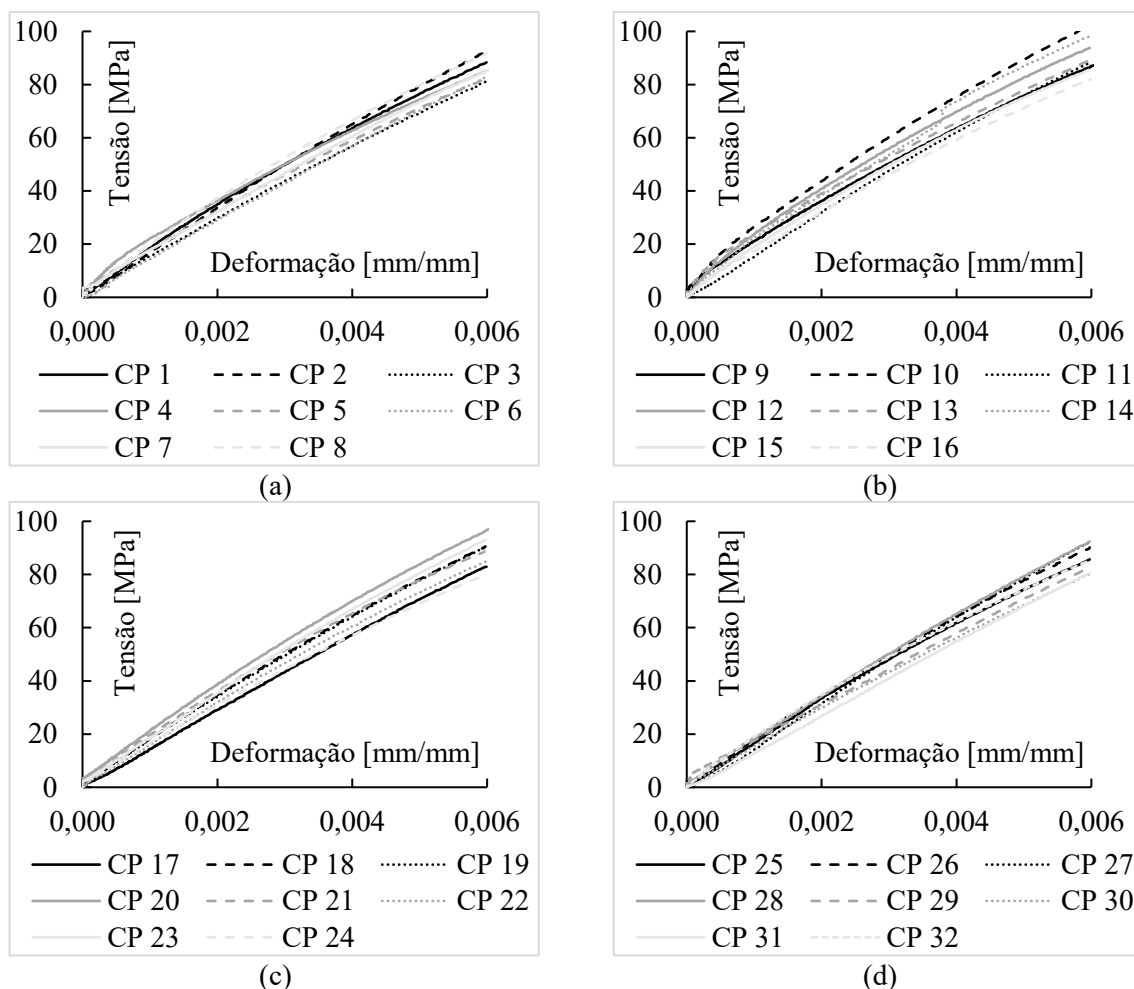


Figura A.1 – Comportamento força *versus* deformação do GFRP utilizado na Série 1, com destaque para: (a) CPs 1 a 8; (b) CPs 9 a 16; (c) CPs 17 a 24; e (d) CPs 25 a 32.

Os resultados obtidos para o GFRP nas diferentes séries mostraram-se satisfatórios e consistentes. A Figura A.1 ilustra o comportamento força *versus* deformação na Série 1, com respostas semelhantes entre CPs. A Tabela A.6 também evidencia essa uniformidade com valores estáveis de módulo de elasticidade para a mesma série. Na Tabela A.4 e Tabela A.5, os valores de resistência à tração do GFRP nas Séries 1, 2, 3 e 4 revelam uma boa homogeneidade, confirmando a qualidade do material nas propriedades mecânicas analisadas.

Aço

O item 10.3, “Aço,” traz os resultados detalhados da caracterização mecânica do aço utilizado nas séries experimentais do estudo. Foram realizados ensaios para determinar propriedades como limite de escoamento, resistência à tração e módulo de elasticidade. Os resultados incluem as medições individuais de cada corpo de prova.

A Tabela A.7 apresenta os resultados do módulo de elasticidade do aço nas Séries 1, 2, 3 e 4. Para as barras de 8,0 mm de diâmetro, o módulo de elasticidade médio foi de

213.459 MPa, com um desvio-padrão de 6.603 MPa e um erro percentual de 3,1%. Para as barras de 10,0 mm, a média registrada foi de 237.367 MPa, com desvio-padrão de 21.444 GPa e erro de 9,0%. No caso do aço de 10,0 mm, foram utilizados apenas dois corpos de prova, pois o ensaio do terceiro apresentou problemas e não pôde ser incluído nos resultados.

Tabela A.7 – Resultados do módulo de elasticidade do aço das Séries 1, 2, 3 a 4.

Barra [mm]	CP	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
8,0	1	214.105	213.459	6.603	3,1
	2	206.557			
	3	219.715			
10,0	1	252.530	237.367	21.444	9,0
	2	222.203			

A Tabela A.8 apresenta os resultados da resistência ao escoamento do aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4, com ensaios realizados em barras de 8,0 mm e 10,0 mm de diâmetro. Para as barras de 8,0 mm, a resistência média ao escoamento foi de 638,1 MPa, com desvio-padrão de 14,0 MPa e erro percentual de 2,2%. Já para as barras de 10,0 mm, a resistência média foi de 676,0 MPa, com desvio-padrão de 7,4 MPa e erro percentual de 1,1%. Esses valores evidenciam a consistência nos resultados de escoamento para barras de diferentes diâmetros.

Tabela A.8 – Resultados da resistência ao escoamento do aço das Séries 1, 2, 3 a 4.

Barra [mm]	CP	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
8,0	1	623,4	638,1	14,0	2,2
	2	639,6			
	3	651,4			
10,0	1	681,2	676,0	7,4	1,1
	2	670,7			

A Tabela A.9 mostra os resultados da resistência à ruptura do aço nas Séries 1, 2, 3 e 4. Para barras de 8,0 mm de diâmetro, a resistência média à ruptura foi de 749,4 MPa, com desvio-padrão de 15,1 MPa e erro percentual de 2,0%. Já nas barras de 10,0 mm, a resistência média foi de 796,9 MPa, com desvio-padrão de 7,3 MPa e erro de 0,9%. Esses resultados indicam uma leve variação na resistência entre os diâmetros

Tabela A.9 – Resultados da resistência à ruptura do aço das Séries 1, 2, 3 e 4.

Barra [mm]	CP	Individual [MPa]	Média [MPa]	Desvio-padrão [MPa]	Erro [%]
8,0	1	733,5	749,4	15,1	2,0
	2	751,2			
	3	763,5			
10,0	1	802,0	796,9	7,3	0,9
	2	791,7			

De modo geral, os resultados apresentados na Tabela A.7, na Tabela A.8 e na Tabela A.9 indicam boas propriedades mecânicas e homogeneidade para o aço utilizado nas Séries 1, 2, 3 e 4. A média do módulo de elasticidade (Tabela A.7), da resistência ao escoamento (Tabela A.8) e da resistência à ruptura (Tabela A.9) mostrou-se consistente entre os diferentes diâmetros, confirmando a qualidade e uniformidade do material nos parâmetros avaliados.

APÊNDICE B: PARÂMETROS MECÂNICOS COMPLEMENTARES

Foram determinados os seguintes parâmetros mecânicos complementares: o coeficiente de rigidez elástico (K_e), o coeficiente de rigidez inelástico (K_i), a força no limite do regime elástico ($Q_{lo,e}$), o deslizamento correspondente ao limite elástico ($S_{lo,e}$), bem como os acréscimos de força ($\Delta Q_{lo,ie}$) e deslizamento ($\Delta S_{lo,ie}$) no regime inelástico.

Dentre esses, o coeficiente de rigidez elástico (K_e) foi calculado com base na inclinação da curva força-deslizamento no trecho correspondente ao regime linear. Para isso, adotou-se um procedimento iterativo baseado na variação do fator de delimitação α , definido como a fração da força máxima ($Q_{lo,u}$) a partir da qual a regressão linear é aplicada.

Foram realizadas 100 regressões lineares para cada curva, considerando valores de α variando de 0,1 a 1,0, em incrementos de 0,01. Para cada intervalo, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) correspondente. Os resultados foram representados graficamente com α no eixo x e os valores de R^2 no eixo y . Esse gráfico permitiu identificar três comportamentos distintos, principalmente nos conectores da Série 1: oscilações nos baixos valores de α (devido à instabilidade do início do ensaio), redução da linearidade nos altos valores de α (associada à transição para o regime inelástico) e uma zona de estabilização central com R^2 elevados e aproximadamente constantes (Figura B.1a). O valor de α foi, assim, definido na região de estabilização do R^2 , garantindo que K_e (Figura B.2b) representasse uma rigidez confiável, com base em dados majoritariamente elásticos.

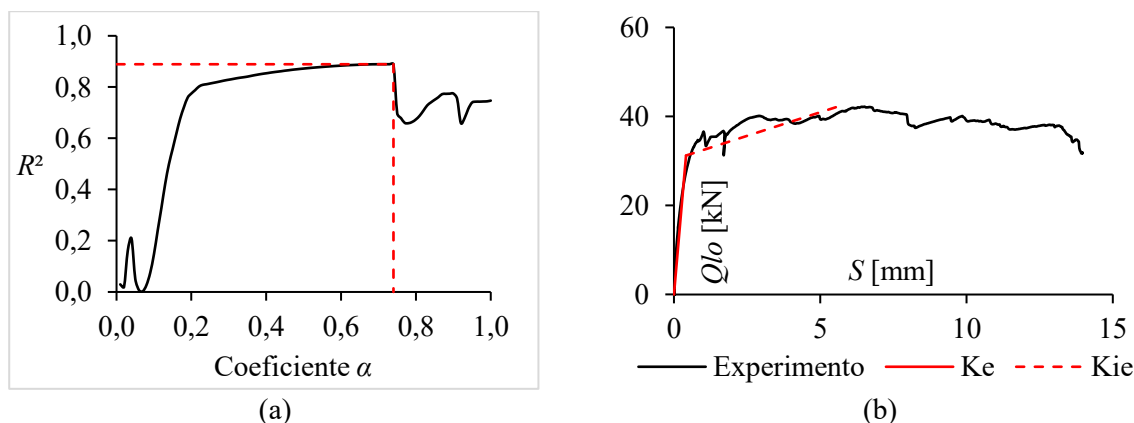


Figura B.1 – Exemplo de obtenção (a) do coeficiente α , em função do coeficiente de determinação R^2 ; para (b) o cálculo dos coeficientes de rigidez elástico (K_e) e inelástico (K_{ie}).

Na maioria dos conectores das Séries 2, 3 e 4, observou-se que os valores de R^2 permaneceram elevados ao longo de praticamente toda a faixa de α , o que indicou um comportamento amplamente linear mesmo em valores elevados de força. Nesses casos, não se verificou uma transição clara para o regime inelástico, de modo que foi possível obter apenas o

coeficiente de rigidez elástico (K_e), não sendo aplicável o cálculo do coeficiente de rigidez inelástico (K_i), conforme mostrado nos gráficos do “Apêndice C: gráficos para determinação dos parâmetros mecânicos complementares”.

Por outro lado, nos casos em que houve redução acentuada da linearidade nas faixas finais da curva (Série 1), evidenciada por uma queda progressiva dos valores de R^2 , foi possível identificar a transição entre os regimes elástico e inelástico. Nesses conectores, o coeficiente de rigidez inelástico (K_i) foi calculado a partir de uma segunda regressão linear, aplicada ao trecho situado entre $Q_{lo,e}$ (força no limite do regime elástico) e $Q_{lo,u}$ (força máxima). Essa regressão buscou representar o comportamento médio da curva no domínio inelástico, permitindo comparar a rigidez residual do conector após o esgotamento da linearidade inicial (Figura B.1b).

Os coeficientes de rigidez elástico (K_e) e inelástico (K_{ie}) foram determinados como contraponto ao coeficiente de rigidez inicial (K_f), obtido pela razão entre 70% da força máxima ($Q_{lo,u}$) e o respectivo deslizamento relativo. Enquanto K_f representa uma estimativa simplificada da rigidez global, K_e e K_{ie} foram calculados por regressões lineares aplicadas a trechos específicos da curva, com base em critérios objetivos definidos a partir do fator α , permitindo uma avaliação mais precisa dos diferentes regimes de comportamento.

Com base na definição de K_e , foram também determinados outros parâmetros que caracterizam a transição entre os regimes elástico e inelástico: a força no limite elástico ($Q_{lo,e}$) e o deslizamento correspondente ($S_{lo,e}$), definidos como o ponto final do trecho linear. A partir desses valores, calcularam-se os acréscimos de força ($\Delta Q_{lo,ie}$) e de deslizamento ($\Delta S_{lo,ie}$) no domínio inelástico, obtidos pela diferença em relação aos valores máximos da curva ($Q_{lo,u}$ e seu deslizamento associado). Esses parâmetros complementam a análise mecânica, fornecendo subsídios para a avaliação da capacidade de redistribuição de esforços e da ductilidade dos conectores.

Para todos os parâmetros mencionados, foram calculadas a média ($\bar{x}$), o desvio-padrão amostral (s_d) e o coeficiente de variação (c_v), com o objetivo de avaliar a dispersão dos resultados. Adicionalmente, foram ajustados modelos de regressão linear ou polinomial, com a apresentação das equações correspondentes e dos respectivos coeficientes de determinação (R^2), classificado conforme proposta apresentada no Quadro B.1. Essas correlações foram elaboradas com o intuito de subsidiar o dimensionamento de conectores do tipo PERFOFRP, com base nas variáveis analisadas.

Quadro B.1 – Proposta de classificação do coeficiente de determinação (R^2) para análise dos resultados experimentais de conectores em painéis sanduíche de concreto.

Valor de R^2	Classificação	Interpretação
0,95 a 1,00	Excelente	Ajuste quase perfeito. Indica altíssima consistência nos resultados dos ensaios experimentais, com variação mínima entre os corpos de prova testados.
0,90 a 0,94	Muito bom	Modelo experimental altamente confiável. Representa com precisão o comportamento mecânico dos conectores, mesmo considerando pequenas variações nos ensaios.
0,80 a 0,89	Bom	Aceitável para ensaios com variabilidade inerente aos materiais e procedimentos de execução. Reflete boa repetibilidade dos resultados.
0,70 a 0,79	Moderado	Aplicável em análises com maior dispersão nos dados, geralmente associada a incertezas experimentais, variações de fabricação ou condições de montagem.
0,50 a 0,69	Fraco	Ajuste limitado. Pode indicar inconsistências nos ensaios, influência de fatores não controlados ou necessidade de revisão na execução dos corpos de prova.
Abaixo de 0,50	Inaceitável	Modelo inadequado para representar o comportamento dos conectores. Recomenda-se reavaliação dos dados experimentais ou da metodologia adotada.

Série 1

Coeficiente de rigidez elástico

Este tópico apresenta a avaliação do comportamento elástico dos conectores da Série 1 por meio do coeficiente de rigidez elástico (K_e), calculado conforme metodologia descrita no item “3.5 Processamento dos dados”. O coeficiente K_e é obtido por meio de uma regressão linear realizada sobre o trecho inicial da curva força versus deslizamento relativo, limitado ao ponto correspondente a $\alpha \cdot Q_{l.o.u.}$, onde α representa uma fração da força máxima. Essa abordagem permite isolar o comportamento predominantemente elástico dos conectores, com base em critérios objetivos de definição do intervalo analisado.

A Tabela B.1 apresenta os resultados individuais, as médias, os desvios-padrão e os coeficientes de variação dos parâmetros α (fator de delimitação do regime elástico), R^2 (coeficiente de determinação da regressão) e K_e para cada configuração da Série 1. A inclusão do parâmetro α fornece transparência ao critério de delimitação do regime elástico, enquanto o valor de R^2 permite avaliar a qualidade do ajuste linear adotado.

Tabela B.1 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,71				0,92				55,28			
S1-57-35-B	0,66	0,70	0,04	5,75	0,99	0,93	0,05	5,88	39,29	56,74	18,22	32,11
S1-57-35-C	0,74				0,89				75,64			
S1-57-25-A	0,80				0,93				26,80			
S1-57-25-2	0,67	0,75	0,07	9,60	0,92	0,94	0,04	3,77	49,63	35,23	12,53	35,57
S1-57-25-C	0,79				0,99				29,27			
S1-57-15-A	0,86				0,82				59,17			
S1-57-15-B	0,95	0,91	0,06	7,03	0,97	0,90	0,11	12,24	32,85	46,01	18,61	40,44
S1-40-35-A	0,67				0,98				51,69			
S1-40-35-B	0,55	0,66	0,11	16,61	0,97	0,97	0,01	0,86	77,43	60,09	15,02	25,01
S1-40-35-C	0,77				0,96				51,13			
S1-40-25-A	0,88	0,88	–	–	0,95	0,95	–	–	41,97	41,97	–	–
S1-40-15-A	0,87				0,96				57,34			
S1-40-15-B	0,59	0,74	0,14	19,07	0,99	0,98	0,02	1,77	40,39	48,40	8,51	17,59
S1-40-15-C	0,75				0,99				47,48			
S1-30-35-A	0,88				0,96				33,44			
S1-30-35-B	0,93	0,91	0,04	3,91	0,90	0,93	0,04	4,55	57,79	45,61	17,22	37,76
S1-30-25-A	0,61				0,97				49,94			
S1-30-25-B	0,75	0,71	0,09	12,28	0,99	0,94	0,06	6,35	30,53	52,86	23,92	45,25
S1-30-25-C	0,77				0,88				78,10			
S1-30-15-A	0,60				0,98				82,15			
S1-30-15-B	0,71	0,66	0,08	11,88	0,98	0,98	0,00	0,23	53,46	67,81	20,28	29,91
S1-CTL-A	1,00				0,98				43,58			
S1-CTL-B	0,61	0,82	0,20	24,01	0,96	0,97	0,02	1,74	56,26	58,86	16,74	28,43
S1-CTL-C	0,84				0,95				76,75			

Os valores médios de α variaram entre 0,66 e 0,91, com boa uniformidade entre réplicas. A maioria dos coeficientes de determinação apresentou valores acima de 0,90, com destaque para diversas configurações cujos R^2 ultrapassaram 0,95, indicando um grau elevado de linearidade no trecho elástico das curvas. O coeficiente K_e , por sua vez, apresentou ampla variação entre as configurações, com valores médios entre 35,23 kN/mm (S1-57-25) e 67,81 kN/mm (S1-30-15-r). Destaca-se ainda o grupo controle (S1-CTL), que apresentou K_e médio de 58,86 kN/mm, com coeficiente de variação de 28,43%.

É importante destacar que o coeficiente K_e será complementado no próximo tópico pela análise do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}), obtido com base no trecho final das curvas, após o regime linear. Esses dois coeficientes, K_e e K_{ie} , são utilizados em conjunto para caracterizar a transição entre os regimes de deformação e compor uma visão mais representativa da rigidez dos conectores. Ambos contrastam com o coeficiente de rigidez inicial (K_I), apresentado anteriormente, que é obtido por meio de um critério simplificado (relação entre 70% da força máxima e o deslocamento correspondente). Com isso, busca-se superar as limitações do método convencional e propor parâmetros de rigidez que reflitam com maior precisão o comportamento real das curvas observadas nos ensaios.

A Figura B.2 apresenta a variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), para diferentes valores da distância entre furos e a borda interna (S_b), com base nos dados estatísticos consolidados na Tabela B.1. A análise foi conduzida com o objetivo de identificar se existe alguma tendência geométrica que influencie o tamanho relativo do regime elástico dos conectores, ou seja, se determinadas configurações possibilitam uma maior ou menor fração elástica ao longo da curva força versus deslizamento.

Na Figura B.2a ($S_b = 35$ mm), observa-se uma leve tendência de redução de α com o aumento de S_h , representada pela equação $y = -0,01x + 1,03$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,46$, o que indica um ajuste fraco. Já na Figura B.2b ($S_b = 25$ mm), a equação obtida foi $y = 0,00x + 0,75$, com $R^2 = 0,01$, apontando ausência total de correlação entre as variáveis. Por outro lado, na Figura B.2c ($S_b = 15$ mm), a equação $y = 0,01x + 0,37$ apresentou $R^2 = 1,00$, sugerindo uma tendência linear perfeita de aumento do fator α com o crescimento de S_h nessa configuração específica.

Apesar desse último resultado, quando se observa o conjunto das três subfiguras, não se identifica um padrão claro e consistente que associe diretamente os parâmetros geométricos analisados à extensão relativa do regime elástico. A variabilidade observada nos dados da Tabela B.1 e os baixos valores de R^2 em dois dos três casos reforçam a conclusão de

que o fator α apresenta comportamento disperso entre as configurações, sendo influenciado por uma combinação de aspectos geométricos e características locais de fissuração e aderência entre o conector e o concreto.

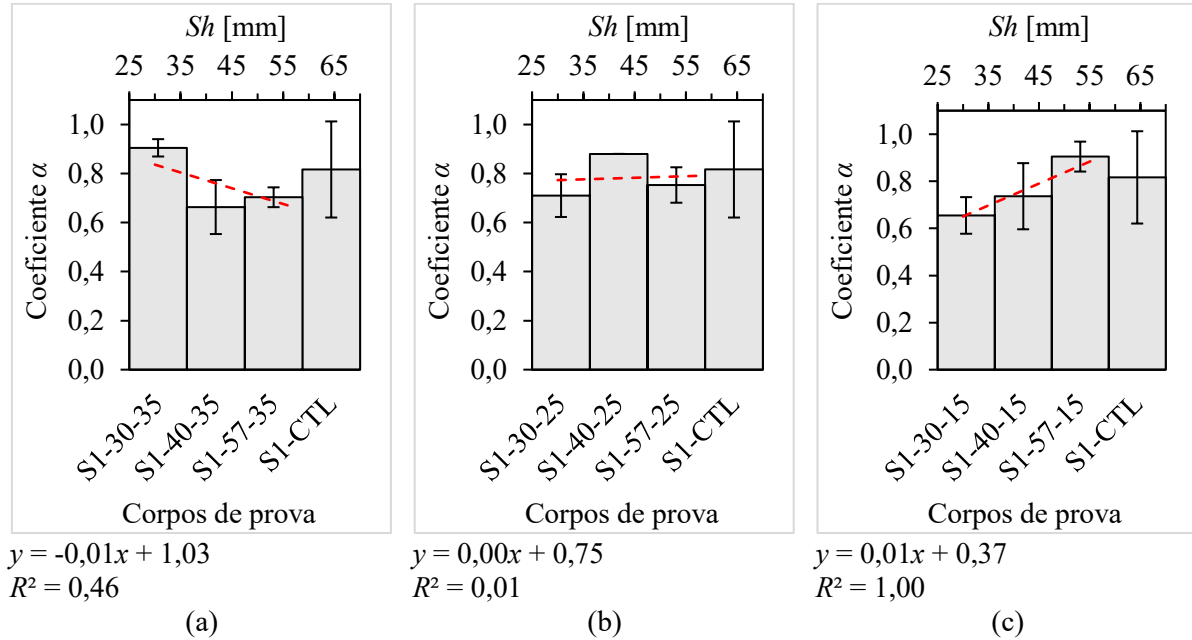


Figura B.2 – Variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

A Figura B.3 apresenta a variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), considerando três diferentes distâncias entre os furos e a borda interna ($S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm). Os valores analisados foram extraídos da Tabela B.1, na qual foram consolidados os dados de K_e obtidos por regressão linear no trecho elástico delimitado pelo fator α .

Na Figura B.3a ($S_b = 35$ mm), a tendência é ligeiramente crescente, com equação $y = 0,35x + 39,45$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,39$, o que representa uma correlação fraca. Já na Figura B.3b ($S_b = 25$ mm), observa-se comportamento inverso, com tendência decrescente ($y = -0,63x + 69,83$) e $R^2 = 0,92$, indicando um ajuste muito bom. A Figura B.3c ($S_b = 15$ mm) também apresenta tendência decrescente ($y = -0,74x + 85,25$), com $R^2 = 0,71$, valor classificado como moderado.

Assim como na Figura B.2, não se identifica um padrão de comportamento claro entre o parâmetro geométrico S_h e a rigidez elástica K_e . A alternância entre tendências crescentes e decrescentes, aliada à variação significativa no grau de ajuste (R^2), reforça a ausência de uma relação sistemática entre as variáveis. Esse resultado sugere que o valor de K_e

pode ser mais influenciado por fatores como a qualidade da interface entre conector e concreto, a concentração de tensões locais ou até variações experimentais, do que por aspectos puramente geométricos.

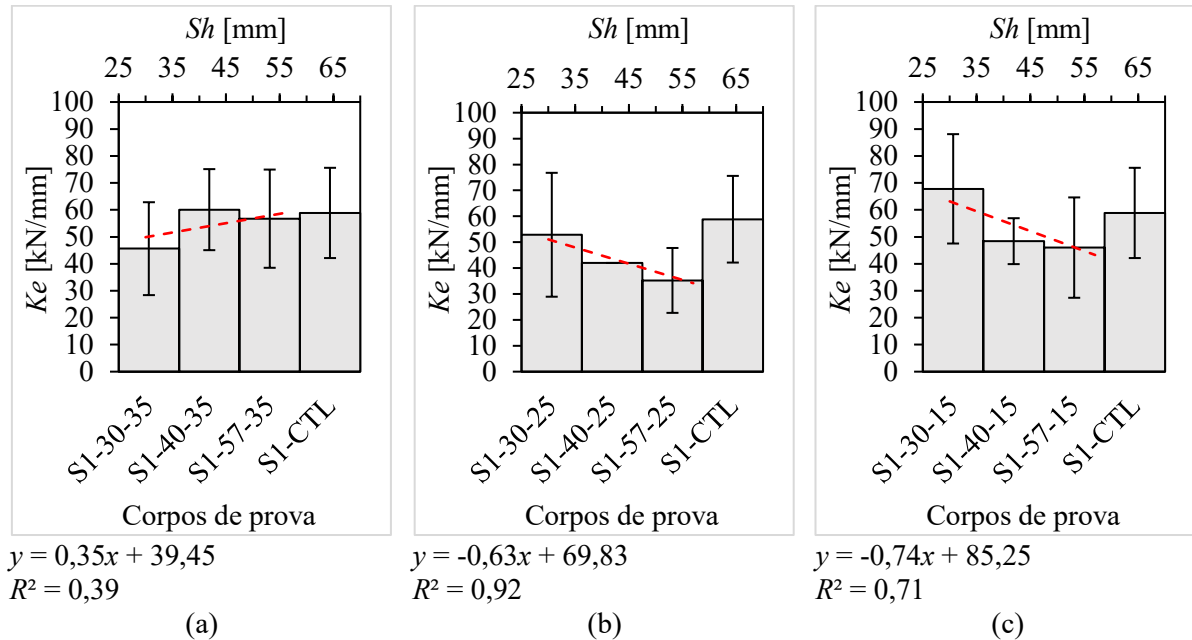


Figura B.3 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

A Figura B.4 apresenta a variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), considerando três diferentes espaçamentos entre furos ($S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm). Os dados foram obtidos com base nos resultados organizados na Tabela B.1, na qual α representa a fração da carga máxima ($Q_{lo.u}$) utilizada para delimitar o intervalo elástico das curvas força versus deslizamento relativo.

Na Figura B.4a ($S_h = 57$ mm), observa-se uma leve tendência decrescente de α com o aumento de S_b , descrita pela equação $y = -0,01x + 1,04$, com $R^2 = 0,92$, indicando um ajuste muito bom. Já na Figura B.4b ($S_h = 40$ mm), a equação $y = -0,00x + 0,85$ resultou em um coeficiente de determinação muito baixo ($R^2 = 0,11$), revelando ausência de correlação entre as variáveis. Por fim, na Figura B.4c ($S_h = 30$ mm), a tendência se inverte e passa a ser crescente, com equação $y = 0,01x + 0,44$ e $R^2 = 0,91$, novamente com um ajuste muito bom.

Apesar dos altos valores de R^2 na Figura B.4a e na Figura B.4c, os sentidos opostos das tendências evidenciam que não há um padrão consistente entre a distância dos furos à borda interna (S_b) e o fator α . Esse comportamento, semelhante ao observado na Figura B.2 e na Figura

B.3, reforça que o tamanho relativo do regime elástico não é controlado de forma direta pelos parâmetros geométricos avaliados. A variabilidade dos resultados pode estar associada a aspectos locais de fissuração, microdanos, dispersão de propriedades do material ou pequenas variações de aderência, que afetam a transição entre os regimes elástico e inelástico de forma distinta entre as configurações.

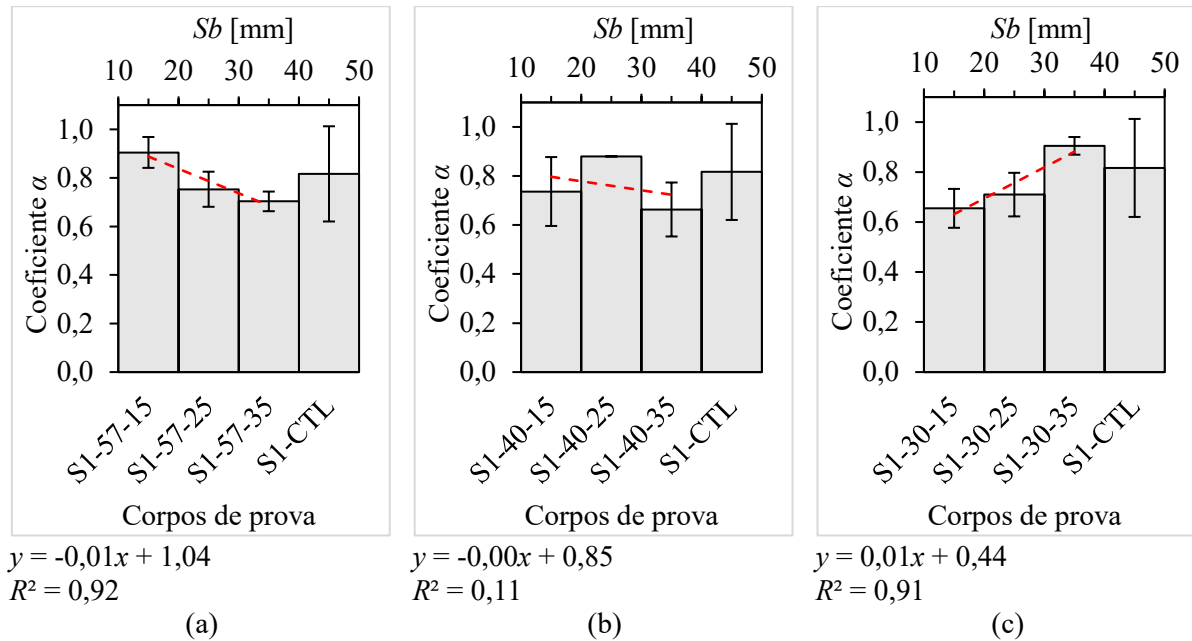


Figura B.4 – Variação do fator de delimitação do regime elástico (α) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

A Figura B.5 apresenta a variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), considerando três diferentes espaçamentos entre furos: 57 mm (Figura 4.35a), 40 mm (Figura B.5b) e 30 mm (Figura B.5c). Os dados foram extraídos da Tabela B.1, na qual K_e foi obtido por regressão linear no trecho da curva força versus deslizamento até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{l,u}$).

Na Figura B.5a ($S_h = 57$ mm), observa-se uma tendência crescente, representada pela equação $y = 0,54x + 32,58$, mas com coeficiente de determinação $R^2 = 0,25$, indicando que o modelo linear possui baixo poder explicativo. A Figura B.5b ($S_h = 40$ mm) também apresenta tendência crescente ($y = 0,58x + 35,55$), mas com um coeficiente de determinação ainda considerado fraco ($R^2 = 0,40$). Já a Figura B.5c ($S_h = 30$ mm) mostra uma tendência decrescente, com equação $y = -1,11x + 83,16$ e $R^2 = 0,96$, valor classificado como excelente, indicando forte correlação entre as variáveis nessa configuração específica.

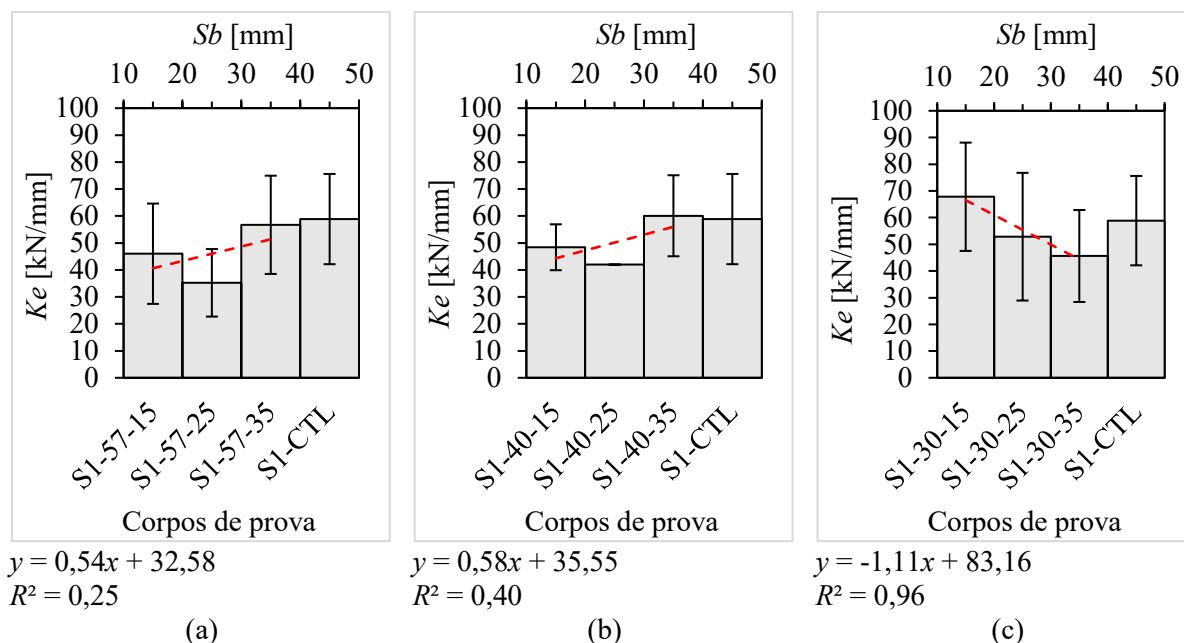


Figura B.5 – Variação do coeficiente de rigidez elástica (K_e) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

Mesmo com esse ajuste elevado no último caso, os sentidos divergentes das tendências (duas crescentes e uma decrescente) e os baixos valores de R^2 na Figura B.5a e na Figura B.5b indicam, novamente, a ausência de um padrão claro entre a distância dos furos à borda interna (S_b) e a rigidez elástica dos conectores. Assim como observado na Figura B.2, Figura B.3 e Figura B.4, os resultados sugerem que o K_e não é diretamente controlado pelos parâmetros geométricos isoladamente, sendo influenciado por múltiplos fatores, como irregularidades locais, comportamento pós-fissuração e variações inerentes ao processo experimental.

A Tabela B.2 apresenta a estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1, com os resultados agrupados por espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). Essa reorganização foi adotada como tentativa de superar as limitações observadas nas análises gráficas anteriores (Figura B.2 a Figura B.4), que não apresentaram tendências consistentes entre os parâmetros geométricos e os valores de K_e ou do fator de delimitação do regime elástico (α). O objetivo deste reagrupamento é obter representações mais robustas e confiáveis, por meio da ampliação do número de réplicas em cada grupo, o que contribui para reduzir a influência de variações pontuais e proporciona maior estabilidade estatística aos dados.

Tabela B.2 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1: valores médios de K_e , fator α e R^2 , por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,71				0,92				55,28			
S1-57-35-B	0,66				0,99				39,29			
S1-57-35-C	0,74				0,89				75,64			
S1-57-25-A	0,80	0,77	0,10	12,79	0,93	0,93	0,06	6,24	26,80	45,99	16,98	36,92
S1-57-25-2	0,67				0,92				49,63			
S1-57-25-C	0,79				0,99				29,27			
S1-57-15-A	0,86				0,82				59,17			
S1-57-15-B	0,95				0,97				32,85			
S1-40-35-A	0,67				0,98				51,69			
S1-40-35-B	0,55				0,97				77,43			
S1-40-35-C	0,77				0,96				51,13			
S1-40-25-A	0,88	0,73	0,13	17,75	0,95	0,97	0,01	1,49	41,97	52,49	12,45	23,72
S1-40-15-A	0,87				0,96				57,34			
S1-40-15-B	0,59				0,99				40,39			
S1-40-15-C	0,75				0,99				47,48			
S1-30-35-A	0,88				0,96				33,44			
S1-30-35-B	0,93				0,90				57,79			
S1-30-25-A	0,61				0,97				49,94			
S1-30-25-B	0,75	0,75	0,12	16,64	0,99	0,95	0,04	4,66	30,53	55,06	19,87	36,10
S1-30-25-C	0,77				0,88				78,10			
S1-30-15-A	0,60				0,98				82,15			
S1-30-15-B	0,71				0,98				53,46			
S1-CTL-A	1,00				0,98				43,58			
S1-CTL-B	0,61	0,82	0,20	24,01	0,96	0,97	0,02	1,74	56,26	58,86	16,74	28,43
S1-CTL-C	0,84				0,95				76,75			

Os resultados contemplam os valores médios de α , do coeficiente de determinação (R^2) e de K_e , bem como seus respectivos desvios-padrão e coeficientes de variação. Apesar de ainda haver variações relevantes, o agrupamento permite observar algumas tendências gerais. No caso de $S_h = 57$ mm, o valor médio de K_e foi de 45,99 kN/mm, com coeficiente de variação de 36,92% e α médio de 0,77. Para $S_h = 40$ mm, observou-se K_e médio de 52,49 kN/mm, com menor dispersão (23,72%) e α médio de 0,73, valores bastante próximos ao grupo anterior. Já para $S_h = 30$ mm, o valor médio de K_e foi o mais elevado entre os grupos com furos (55,06 kN/mm), ainda que com dispersão significativa (36,10%) e α médio de 0,75.

Esses resultados demonstram que, embora não haja uma relação direta ou linear evidente entre o espaçamento entre furos e os parâmetros analisados, a sistematização dos dados em grupos com mais réplicas favorece a obtenção de valores médios mais representativos. A proximidade entre os valores médios de α (variando entre 0,73 e 0,77) também sugere certa estabilidade no comportamento elástico das curvas, independentemente da geometria específica.

Um ponto que merece atenção é o desempenho do grupo controle (S1- C_{TL}), que apresentou os maiores valores médios tanto para o coeficiente de rigidez elástica ($K_e = 58,86$ kN/mm) quanto para o fator de delimitação do regime elástico ($\alpha = 0,82$). Esse comportamento pode ser atribuído à ausência de furos, o que proporciona maior área de contato entre o GFRP e o concreto e favorece um regime de deformação mais uniforme, com menor concentração de tensões locais. A ausência de descontinuidades geométricas também tende a prolongar o trecho linear da curva força versus deslizamento, justificando os elevados valores de α e K_e observados. Esses dados reforçam a influência dos furos como elementos que reduzem a rigidez e antecipam o início do comportamento não linear nos conectores.

Em síntese, embora o agrupamento por S_h não tenha revelado tendências definitivas entre os parâmetros geométricos e a rigidez elástica, ele contribui para uma melhor compreensão estatística do comportamento dos conectores e fornece uma base mais sólida para as análises gráficas subsequentes.

A Figura B.6 complementa os resultados apresentados na Tabela B.2 ao ilustrar, graficamente, a relação entre o espaçamento entre furos (S_h) e os dois parâmetros principais analisados: o fator de delimitação do regime elástico (α) e o coeficiente de rigidez elástica (K_e), ambos calculados independentemente da distância entre os furos e a borda (S_b). A visualização permite verificar com mais clareza se há alguma tendência entre S_h e os parâmetros que definem o comportamento elástico dos conectores da Série 1.

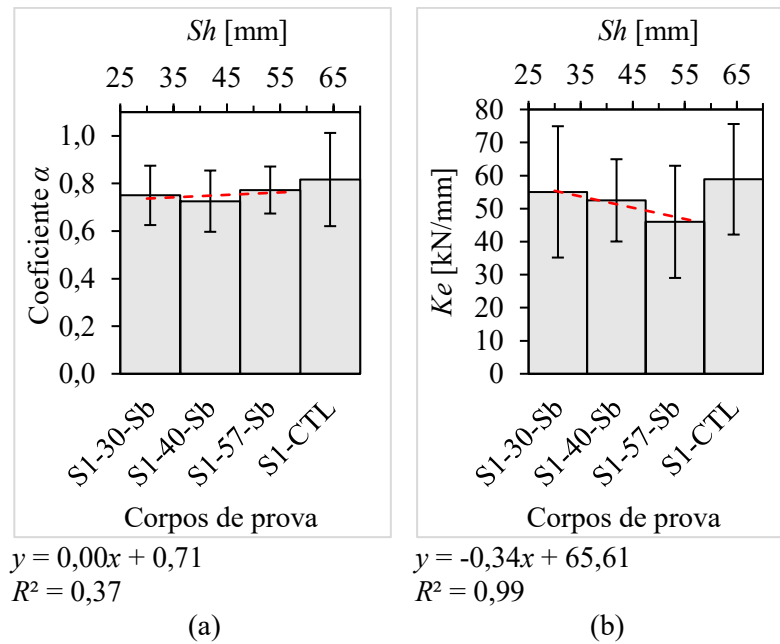


Figura B.6 – Variação (a) do fator de delimitação do regime elástico (α) e do (b) coeficiente de rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Na Figura B.6a, observa-se uma linha praticamente horizontal, representada pela equação $y = 0,00x + 0,71$ (na prática horizontal, com inclinação nula), com coeficiente de determinação $R^2 = 0,37$, valor que, conforme a classificação adotada no item “3.5 Processamento dos dados”, é considerado fraco. Isso indica que não há correlação estatisticamente relevante entre o espaçamento entre furos e o valor do fator α . Essa tendência já havia sido percebida nas análises anteriores e é agora reforçada por meio do agrupamento com maior número de réplicas. Ou seja, o fator α , que define o limite de atuação do regime elástico com base em uma fração da carga máxima, não sofre variação sistemática em função de S_h .

Por outro lado, a Figura B.6b apresenta um comportamento bastante distinto. A regressão linear definida pela equação $y = -0,34x + 65,61$ apresenta um coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, classificado como excelente, sugerindo um forte ajuste do modelo aos dados. Isso indica uma tendência decrescente bem definida entre S_h e K_e : quanto maior o espaçamento entre furos, menor tende a ser a rigidez elástica média dos conectores. Essa conclusão complementa os dados da Tabela B.2, na qual os valores médios de K_e decrescem de 55,06 kN/mm ($S_h = 30$ mm) para 52,49 kN/mm ($S_h = 40$ mm) e 45,99 kN/mm ($S_h = 57$ mm). Trata-se de uma tendência relevante, sobretudo por ter sido obtida com maior número de réplicas em cada grupo, o que confere maior robustez ao modelo.

Assim, os gráficos da Figura B.6 reforçam que, embora o fator α permaneça relativamente estável frente à variação de S_h , o coeficiente de rigidez elástica K_e é influenciado de forma mais clara e consistente pelo espaçamento entre furos, com conectores mais densamente perfurados apresentando maior rigidez no regime elástico. Essa constatação contribui para a compreensão do papel dos parâmetros geométricos no desempenho inicial das ligações.

A Tabela B.0.3 apresenta a estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1, bem como os valores médios do fator de delimitação do regime elástico (α) e dos coeficientes de determinação (R^2), organizados por distância entre furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h). Esta abordagem, complementar à apresentada na Tabela B.2, visa ampliar a quantidade de réplicas por agrupamento geométrico, buscando identificar possíveis tendências no comportamento elástico, em substituição aos gráficos anteriores que apresentaram desempenho limitado.

De maneira geral, não foi identificado um padrão muito claro entre os valores de K_e , α e a variação de S_b . Para o fator α , observou-se uma leve tendência de crescimento com o aumento de S_b : os valores médios passaram de 0,76 ($S_b = 15$ mm) para 0,75 ($S_b = 25$ mm) e 0,74 ($S_b = 35$ mm), mas essas diferenças são pequenas e acompanhadas de coeficientes de variação relativamente altos, como 18,20% para $S_b = 15$ mm e 16,57% para $S_b = 35$ mm. Isso indica que a variação entre réplicas foi significativa, dificultando a confirmação de uma tendência robusta.

Em relação ao coeficiente de rigidez elástica (K_e), os valores médios variaram entre 43,75 kN/mm ($S_b = 25$ mm) e 55,21 kN/mm ($S_b = 35$ mm), mas sem uma relação evidente entre os valores e a variável S_b . Os coeficientes de variação, em geral elevados (como 40,97% para $S_b = 25$ mm e 29,70% para $S_b = 15$ mm) também reforçam a ausência de um comportamento sistemático. Por outro lado, o coeficiente de determinação (R^2) manteve-se alto em todos os grupos (variando entre 0,95 e 0,97), o que confirma a qualidade dos ajustes lineares utilizados na obtenção de K_e .

Esses resultados indicam que, embora o agrupamento por S_b tenha permitido a utilização de um maior número de réplicas, as variabilidades internas permanecem elevadas e as tendências entre as variáveis geométricas e os parâmetros elásticos ainda não se mostram claramente definidas.

Tabela B.0.3 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1: valores médios de K_e , fator α e R^2 , por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,71				0,92				55,28			
S1-57-35-B	0,66				0,99				39,29			
S1-57-35-C	0,74				0,89				75,64			
S1-40-35-A	0,67	0,74	0,12	16,57	0,98	0,95	0,04	4,18	51,69	55,21	15,47	28,01
S1-40-35-B	0,55				0,97				77,43			
S1-40-35-C	0,77				0,96				51,13			
S1-30-35-A	0,88				0,96				33,44			
S1-30-35-B	0,93				0,90				57,79			
S1-57-25-A	0,80				0,93				26,80			
S1-57-25-B	0,67				0,92				49,63			
S1-57-25-C	0,79				0,99				29,27			
S1-40-25-A	0,88	0,75	0,09	11,80	0,95	0,95	0,04	4,27	41,97	43,75	17,93	40,97
S1-30-25-A	0,61				0,97				49,94			
S1-30-25-B	0,75				0,99				30,53			
S1-30-25-C	0,77				0,88				78,10			
S1-57-15-A	0,86				0,82				59,17			
S1-57-15-B	0,95				0,97				32,85			
S1-40-15-A	0,87				0,96				57,34			
S1-40-15-B	0,59	0,76	0,14	18,20	0,99	0,96	0,06	6,38	40,39	53,26	15,82	29,70
S1-40-15-C	0,75				0,99				47,48			
S1-30-15-A	0,60				0,98				82,15			
S1-30-15-B	0,71				0,98				53,46			
S1-CTL-A	1,00				0,98				43,58			
S1-CTL-B	0,61	0,82	0,20	24,01	0,96	0,97	0,02	1,74	56,26	58,86	16,74	28,43
S1-CTL-C	0,84				0,95				76,75			

A Figura B.7 apresenta a variação do fator de delimitação do regime elástico (α) (Figura B.7a) e do coeficiente de rigidez elástica (K_e) (Figura B.7b) dos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h). Os dados médios utilizados nos gráficos são os mesmos consolidados na Tabela B.0.3, servindo aqui como apoio visual para verificar possíveis tendências entre S_b e os parâmetros analisados.

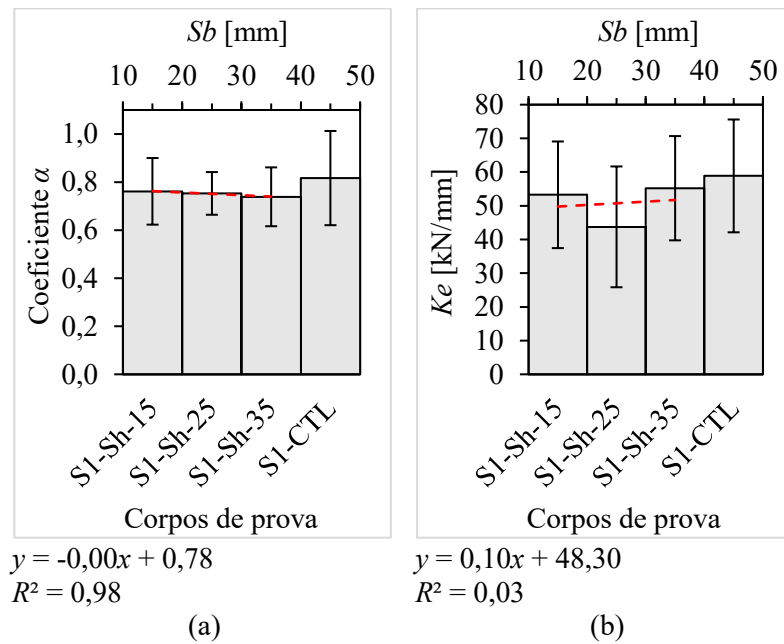


Figura B.7 – Variação (a) do fator de delimitação do regime elástico (α) e do (b) coeficiente de rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Na Figura B.7a, observa-se uma reta praticamente horizontal, com equação $y = -0,00x + 0,78$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$, o que indica excelente qualidade de ajuste, mas ao mesmo tempo evidencia a ausência de variação significativa do fator α com o aumento de S_b . Isso reforça o que foi discutido na tabela anterior: os valores médios de α ficaram muito próximos entre si, e a alta variabilidade interna dificulta qualquer interpretação que sugira dependência entre α e a distância dos furos às bordas.

Já na Figura B.7b, a relação entre K_e e S_b é ainda menos evidente. A equação da reta de regressão é $y = 0,10x + 48,30$, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,03$, classificado como inaceitável, indicando que praticamente não há correlação linear entre as variáveis analisadas. Esse resultado confirma o já observado na Tabela B.0.3: embora os valores médios de K_e variem com S_b , não se verifica uma tendência clara ou consistente, reforçando a conclusão de que a distância entre os furos e a borda interna não exerce influência significativa e

sistemática sobre o comportamento elástico dos conectores, ao menos nos limites da amostragem utilizada.

Coeficiente de rigidez inelástico

A proposta de adoção do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) surge como complemento ao coeficiente de rigidez elástica (K_e), discutido no item anterior. Enquanto o K_e busca representar a rigidez da ligação até o limite do regime elástico, definido a partir do fator de delimitação α , o K_{ie} tem como objetivo caracterizar a rigidez da ligação na fase pós-elástica, durante o trecho ascendente da curva força versus deslizamento relativo, a partir do ponto $\alpha \cdot Q_{lo.u}$ até a carga máxima ($Q_{lo.u}$). Essa estimativa é obtida por regressão linear nesse intervalo da curva, buscando representar o comportamento do conector quando há acomodação progressiva e deformações mais pronunciadas, sem acréscimo expressivo de carga.

A Tabela B.0.4 apresenta os resultados individuais e estatísticos obtidos para o coeficiente K_{ie} e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) nos conectores da Série 1. De modo geral, observa-se elevada variabilidade nos valores obtidos para K_{ie} entre as diferentes configurações, sem um padrão claro de comportamento associado aos parâmetros geométricos S_h e S_b . Os coeficientes de variação foram, em muitos casos, significativamente altos. Destacam-se, por exemplo, as configurações S1-40-35 ($c_v = 81,40\%$) e S1-57-25 ($c_v = 60,11\%$), que apresentaram elevada dispersão dos resultados, mesmo com valores médios de K_{ie} relativamente próximos de outras configurações.

Apesar dessa dispersão, os coeficientes de determinação (R^2) foram, na maioria dos casos, muito bons ou excelentes. Conectores como S1-30-25 ($R^2 = 0,98$), S1-30-15 ($R^2 = 0,98$) e S1-40-15 ($R^2 = 0,93$) apresentaram regressões com forte ajuste aos dados experimentais no trecho considerado. Isso demonstra que, embora os valores de K_{ie} sejam sensíveis à variabilidade dos ensaios, a metodologia aplicada para sua obtenção foi eficaz para modelar esse comportamento.

O grupo controle (S1- C_{TL}) apresentou valores relativamente baixos de K_{ie} , com média de 1,73 kN/mm e c_v de 45,56%, coerente com seu comportamento mais estável e menos deformável, resultado da ausência de furos nos conectores. A próxima etapa de análise apresentará os gráficos correspondentes às variações médias de K_{ie} em função das variáveis geométricas, com o objetivo de verificar se existe alguma tendência mais clara quando os resultados são agrupados por S_h ou S_b .

Tabela B.0.4 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	R^2				K_{ie}			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,93				4,05			
S1-57-35-B	0,93	0,92	0,01	0,99	2,10	2,75	1,12	40,68
S1-57-35-C	0,91				2,12			
S1-57-25-A	0,93				1,13			
S1-57-25-2	0,98	0,96	0,03	2,96	5,14	3,49	2,10	60,11
S1-57-25-C	0,97				4,19			
S1-57-15-A	0,97				2,23			
S1-57-15-B	0,78	0,87	0,13	14,98	1,63	1,93	0,43	22,10
S1-40-35-A	0,95				1,21			
S1-40-35-B	0,99	0,96	0,02	2,57	9,07	4,86	3,96	81,40
S1-40-35-C	0,94				4,31			
S1-40-25-A	0,92	0,92	–	–	2,04	2,04	–	–
S1-40-15-A	0,85				3,07			
S1-40-15-B	0,99	0,93	0,08	8,07	7,58	4,63	2,56	55,17
S1-40-15-C	0,97				3,24			
S1-30-35-A	0,89				2,24			
S1-30-35-B	0,83	0,86	0,04	4,55	1,49	1,86	0,53	28,32
S1-30-25-A	0,96				7,17			
S1-30-25-B	0,99	0,98	0,01	1,31	4,00	5,46	1,60	29,31
S1-30-25-C	0,98				5,21			
S1-30-15-A	0,97				10,53			
S1-30-15-B	1,00	0,98	0,02	2,04	8,19	9,36	1,65	17,66
S1-CTL-A	-				-			
S1-CTL-B	0,91	0,90	0,02	1,77	2,29	1,73	0,79	45,56
S1-CTL-C	0,89				1,17			

A Figura B.8 apresenta a variação do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), para três diferentes distâncias entre os furos e a borda interna (S_b), conforme os dados consolidados na Tabela B.0.4.

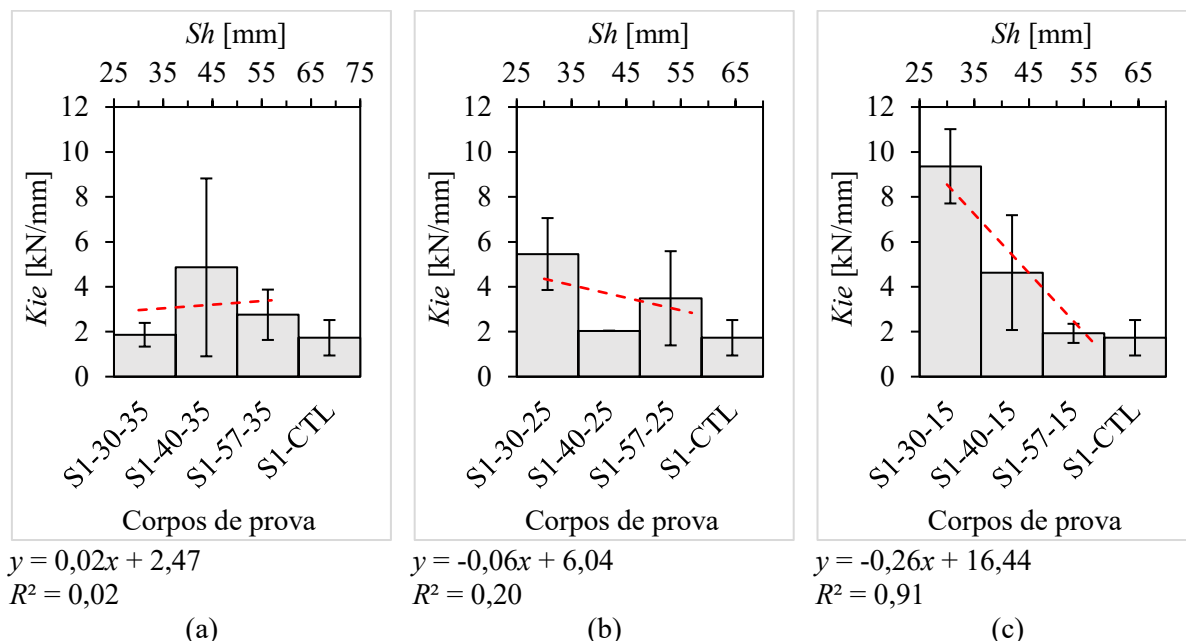


Figura B.8 – Variação do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos (30 mm, 40 mm e 57 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm.

Na Figura B.8a ($S_b = 35$ mm) e na Figura B.8b ($S_b = 25$ mm), observa-se a ausência de tendências consistentes entre as variáveis analisadas. Os coeficientes de determinação foram bastante baixos ($R^2 = 0,02$ e $R^2 = 0,20$, respectivamente), indicando que os modelos de regressão linear não se ajustam adequadamente aos dados experimentais. A dispersão dos pontos reforça a conclusão de que, nessas condições geométricas, não há uma correlação clara entre o espaçamento entre furos e o valor de K_{ie} .

Por outro lado, a Figura B.8c ($S_b = 15$ mm) apresentou um comportamento distinto. A regressão obtida, $y = -0,26x + 16,44$, apresentou um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,91$), classificado como muito bom, o que sugere um possível padrão decrescente entre S_h e K_{ie} nessa configuração específica. No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que não encontra respaldo nos demais gráficos da figura. A falta de consistência entre as três configurações sugere que essa tendência isolada pode ser influenciada por particularidades da amostra ou por variações experimentais.

A Figura B.9 apresenta a variação do coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b),

para diferentes espaçamentos entre furos ($S_h = 57$ mm, 40 mm e 30 mm). Os gráficos mostram a média dos valores obtidos para cada configuração geométrica, conforme já analisado na Tabela B.0.4.

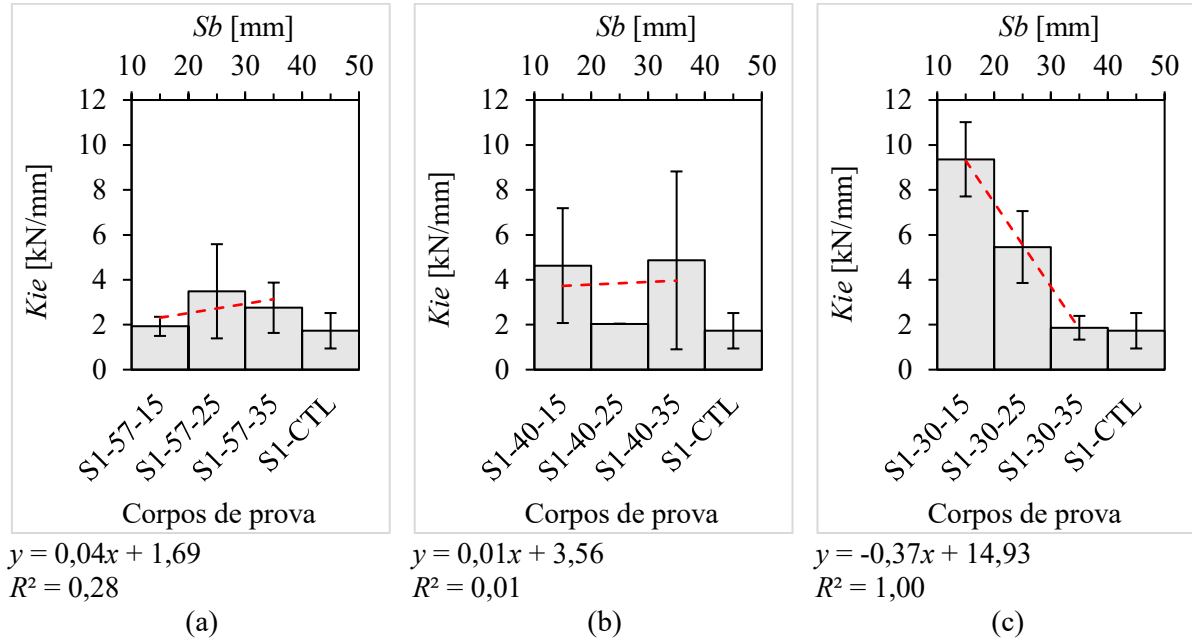


Figura B.9 – Variação do coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}) nos conectores da Série 1 em função da distância entre furos e borda (15 mm, 25 mm e 35 mm), para diferentes espaçamentos entre furos: (a) 57 mm; (b) 40 mm; e (c) 30 mm.

De forma geral, a maior parte dos modelos de regressão linear apresentou baixo poder de explicação. As Figura B.9a ($S_h = 57$ mm) e Figura B.9b ($S_h = 40$ mm) exibiram coeficientes de determinação baixos ($R^2 = 0,28$ e $R^2 = 0,01$, respectivamente), o que revela ausência de tendência clara entre S_b e K_{ie} nessas condições. Por outro lado, a Figura B.9c ($S_h = 30$ mm) apresentou um ajuste quase perfeito ($R^2 = 1,00$), com uma tendência decrescente de K_{ie} em função de S_b , descrita pela equação $y = -0,37x + 14,93$.

Esse comportamento consistente da Figura B.9c encontra paralelo na Figura B.8a, que também exibiu o melhor desempenho entre os três gráficos daquele conjunto. Ambas as situações correspondem a configurações com furos mais próximos entre si ($S_h = 30$ mm na Figura B.9c e $S_b = 35$ mm na Figura B.8a), o que pode sugerir que essa geometria favorece uma resposta mecânica mais uniforme no trecho inelástico. Ainda assim, essa possível tendência deve ser interpretada com cautela, pois não se repete nas demais combinações analisadas.

Adicionalmente, destaca-se que a configuração S1-30-15 apresentou o maior valor médio de K_{ie} entre todos os grupos avaliados, atingindo 9,36 kN/mm, o que reforça seu desempenho superior na fase pós-elástica. Esse resultado evidencia que, mesmo diante da

dispersão observada em várias configurações, certos arranjos geométricos podem contribuir de forma significativa para o aumento da rigidez no trecho final da curva força versus deslizamento relativo

A Tabela B.5 apresenta os valores médios do coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) e dos respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). A sistematização tem por objetivo verificar se o agrupamento por S_h , com maior número de réplicas, poderia revelar tendências mais consistentes de comportamento.

Observa-se uma tendência geral de aumento de K_{ie} com a redução do espaçamento entre furos: os valores médios cresceram de 2,82 kN/mm ($S_h = 57$ mm) para 4,36 kN/mm ($S_h = 40$ mm) e 5,55 kN/mm ($S_h = 30$ mm). Essa variação pode estar relacionada ao fato de que, com a aproximação entre os furos, aumenta-se a distância entre os furos extremos (superior ou inferior) e a borda do conector. Com isso, o caminho para a propagação das fissuras se alonga, o que tende a dificultar sua abertura e aumentar a rigidez da ligação na fase pós-elástica.

Apesar da alta dispersão entre as réplicas, com coeficientes de variação de 50,87% ($S_h = 57$ mm), 66,70% ($S_h = 40$ mm) e 59,05% ($S_h = 30$ mm), a tendência média é evidente. Os coeficientes de determinação R^2 , por sua vez, mantiveram-se elevados (entre 0,90 e 0,94), indicando bom ajuste das regressões lineares no trecho utilizado para cálculo de K_{ie} . Esses resultados reforçam a utilidade desse parâmetro para representar a rigidez na fase pós-elástica de carregamento, mesmo diante da variabilidade natural dos ensaios.

Tabela B.5 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1: valores médios de K_{ie} e R^2 , por espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Código	R^2				K_{ie}			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,93	0,92	0,06	6,80	4,05	2,82	1,44	50,87
S1-57-35-B	0,93				2,10			
S1-57-35-C	0,91				2,12			
S1-57-25-A	0,93				1,13			
S1-57-25-2	0,98				5,14			
S1-57-25-C	0,97				4,19			
S1-57-15-A	0,97				2,23			
S1-57-15-B	0,78				1,63			
S1-40-35-A	0,95	0,94	0,05	5,13	1,21	4,36	2,91	66,70
S1-40-35-B	0,99				9,07			
S1-40-35-C	0,94				4,31			
S1-40-25-A	0,92				2,04			
S1-40-15-A	0,85				3,07			
S1-40-15-B	0,99				7,58			
S1-40-15-C	0,97				3,24			
S1-30-35-A	0,89				2,24			
S1-30-35-B	0,83	1,49						
S1-30-25-A	0,96	7,17						
S1-30-25-B	0,99	4,00						
S1-30-25-C	0,98	5,21						
S1-30-15-A	0,97	10,53						
S1-30-15-B	1,00	8,19						
S1-CTL-A	-	-	0,90	0,02	1,77	1,73	0,79	45,56
S1-CTL-B	0,91	2,29						
S1-CTL-C	0,89	1,17						

Dando continuidade à análise iniciada com a Tabela B.5, a Figura B.10 apresenta graficamente a variação do coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) em função do espaçamento entre furos (S_h), agrupando os dados independentemente da distância entre os furos e a borda (S_b). A regressão linear obtida, com equação $y = -0,10x + 8,47$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, confirma a tendência observada na tabela anterior: há um comportamento médio bem definido de aumento da rigidez inelástica com a redução do espaçamento entre furos.

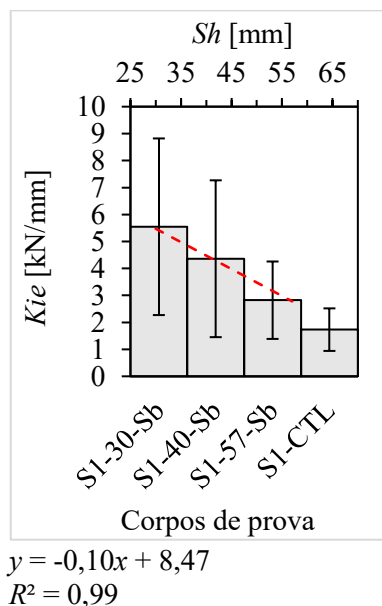


Figura B.10 – Variação coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos (S_h), independentemente do espaçamento entre furos e borda (S_b).

Esse resultado, aliado ao alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$), sugere que pode haver influência do espaçamento entre furos sobre a rigidez do sistema na fase pós-elástica. Conforme discutido anteriormente, a aproximação entre os furos tende a aumentar a distância entre os pontos críticos e as bordas do conector, o que pode alongar o trajeto de fissuração e favorecer uma maior resistência à deformação nessa etapa do carregamento. Ainda que os valores individuais de K_{ie} apresentem dispersão significativa, a análise agrupada possibilita visualizar essa tendência com maior clareza.

A Tabela B.6 apresenta os valores médios do coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os conectores da Série 1, organizados por distância entre os furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h). A organização dos dados tem como objetivo identificar eventuais padrões relacionados ao posicionamento dos furos no conector e sua influência na rigidez pós-elástica da ligação.

Tabela B.6 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1: valores médios de K_{ie} e R^2 , por espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Código	R^2				K_{ie}			
	x_n	$\bar{x}$	s_d	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s_d [kN/mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	0,93				4,05			
S1-57-35-B	0,93				2,10			
S1-57-35-C	0,91				2,12			
S1-40-35-A	0,95	0,92	0,05	4,95	1,21	3,32	2,58	77,54
S1-40-35-B	0,99				9,07			
S1-40-35-C	0,94				4,31			
S1-30-35-A	0,89				2,24			
S1-30-35-B	0,83				1,49			
S1-57-25-A	0,93				1,13			
S1-57-25-2	0,98				5,14			
S1-57-25-C	0,97				4,19			
S1-40-25-A	0,92	0,96	0,03	2,81	2,04	4,13	2,03	49,28
S1-30-25-A	0,96				7,17			
S1-30-25-B	0,99				4,00			
S1-30-25-C	0,98				5,21			
S1-57-15-A	0,97				2,23			
S1-57-15-B	0,78				1,63			
S1-40-15-A	0,85				3,07			
S1-40-15-B	0,99	0,93	0,08	8,87	7,58	5,21	3,49	66,95
S1-40-15-C	0,97				3,24			
S1-30-15-A	0,97				10,53			
S1-30-15-B	1,00				8,19			
S1-CTL-A	-				-			
S1-CTL-B	0,91	0,90	0,02	1,77	2,29	1,73	0,79	45,56
S1-CTL-C	0,89				1,17			

Observa-se uma tendência geral de aumento do valor médio de K_{ie} com a diminuição da distância entre os furos e a borda interna do conector. O valor médio foi de 4,63 kN/mm para $S_b = 15$ mm, seguido de 3,85 kN/mm para $S_b = 25$ mm e 3,17 kN/mm para $S_b = 35$ mm. Embora a diferença entre os valores não seja abrupta, essa tendência pode estar associada ao fato de que furos mais próximos à borda interna delimitam trajetórias de fissuração mais definidas e concentradas, reduzindo o aparecimento de múltiplas fissuras ramificadas. Como consequência, a deformação tende a se concentrar em regiões específicas, o que pode elevar a rigidez da ligação no trecho pós-elástico.

Contudo, é necessário interpretar esses resultados com cautela. Os coeficientes de variação de K_{ie} foram consideravelmente altos para as três categorias analisadas, situando-se entre 28% e 41%, o que indica significativa dispersão entre os resultados individuais. Essa variabilidade pode decorrer de fatores como diferenças locais de aderência, posicionamento dos furos, pequenas assimetrias nas geometrias dos conectores ou variações no comportamento do material. Ainda assim, a média dos coeficientes de determinação (R^2) se manteve elevada (acima de 0,90), sugerindo que, apesar da dispersão, a metodologia de obtenção de K_{ie} por regressão linear no trecho pós-elástico das curvas foi eficaz para modelar a tendência geral do comportamento dos conectores.

A Figura B.11 apresenta a variação do coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) em função da distância entre os furos e a borda interna dos conectores (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h), com base nos valores médios organizados na Tabela B.6. A regressão linear resultou na equação $y = -0,10x + 8,47$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,99$, indicando uma tendência clara de aumento da rigidez inelástica à medida que os furos se aproximam da borda interna do conector.

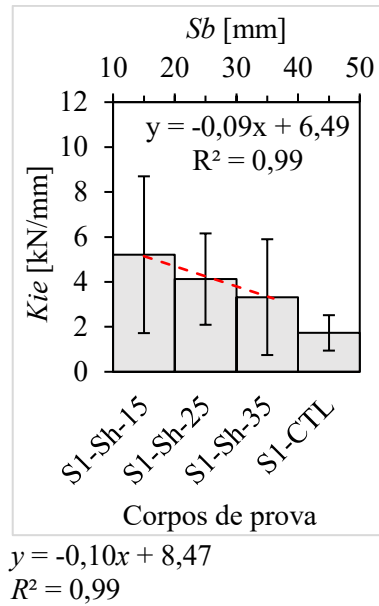


Figura B.11 – Variação coeficiente de rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 1 em função do espaçamento entre furos e borda (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h).

Esse comportamento pode estar associado ao fato de que furos mais próximos à borda tendem a apresentar trajetórias de fissuração mais bem definidas e com menor propagação, o que limita a formação de múltiplas fissuras e concentra a deformação em regiões específicas. Com menor extensão de fissuras, o conector tende a deformar menos sob carregamento, o que resulta em um aumento do coeficiente de rigidez inelástica.

Ao comparar com a Figura B.10, observa-se que, embora se trate de análises distintas, uma com base no espaçamento entre furos (S_h) e outra na distância dos furos à borda interna (S_b), ambas revelaram o mesmo padrão geral: a rigidez inelástica aumenta quando os furos estão mais próximos, seja entre si (Figura B.10), seja da borda interna do conector (Figura B.11). Esses resultados sugerem que a concentração geométrica dos furos, tanto horizontal quanto verticalmente, exerce influência significativa no comportamento do conector na fase pós-elástica.

Força no limite do regime elástico, deslizamento no limite do regime elástico, acréscimo de força no regime inelástico e acréscimo de deslizamento no regime inelástico

A caracterização do comportamento mecânico dos conectores também requer a identificação de parâmetros que delimitem as fases elástica e inelástica do carregamento. Neste contexto, este tópico apresenta os resultados referentes à força no limite do regime elástico ($Q_{lo,e}$), ao deslizamento correspondente ($S_{lo,e}$), ao acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e ao acréscimo de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$). Esses parâmetros foram obtidos a partir da definição do ponto de transição entre os regimes elástico e inelástico, adotando-se o valor $\alpha \cdot Q_{lo,u}$, conforme metodologia descrita no item “3.5 Processamento dos dados”.

Essa abordagem complementa a análise dos coeficientes de rigidez elástica (K_e) e inelástica (K_{ie}), permitindo avaliar o desempenho intermediário dos conectores, ou seja, o quanto ainda conseguem resistir e deformar após o fim do regime elástico, até atingir a força máxima. Trata-se, portanto, de uma ferramenta adicional para compreender a transição de comportamento ao longo da curva força versus deslizamento relativo.

A Tabela B.7 apresenta os valores individuais, médios, desvios-padrão e coeficientes de variação dos quatro parâmetros citados, para os conectores da Série 1. Os resultados mostram que os valores médios de $Q_{lo,e}$ variaram entre aproximadamente 25 kN e 39 kN, com destaque para a configuração S1-57-15 ($Q_{lo,e} = 38,90$ kN), que apresentou o maior valor no regime elástico. De modo geral, os coeficientes de variação foram moderados, com exceção do grupo controle (S1-CTL), que registrou $c_v = 32,23\%$, indicando maior dispersão entre as réplicas.

Os deslocamentos correspondentes ($S_{lo,e}$) permaneceram abaixo de 1,10 mm em todas as configurações, confirmando o comportamento rígido típico do regime elástico. Entretanto, algumas configurações apresentaram elevada variabilidade, como S1-57-25 ($c_v = 40,92\%$) e S1-30-25 ($c_v = 52,31\%$), possivelmente em função da sensibilidade do início da curva às condições de apoio e instrumentação.

No regime inelástico, os acréscimos de força ($\Delta Q_{lo,ie}$) variaram de 4,92 kN (S1-40-25) a 18,13 kN (S1-30-15), evidenciando o impacto da geometria dos conectores no prolongamento da capacidade resistente após o limite elástico. Já os acréscimos de deslocamento ($\Delta S_{lo,ie}$) oscilaram de 1,67 mm (S1-30-15) a 5,57 mm (S1-40-35), este último representando o maior valor registrado, mas também com c_v elevado (99,81%).

Tabela B.7 – $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v .

Código	$Q_{lo,e}$				$S_{lo,e}$				$\Delta Q_{lo,ie}$				$\Delta S_{lo,ie}$			
	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	34,69				0,63				14,17				3,50			
S1-57-35-B	29,59	31,83	2,60	8,17	0,75	0,60	0,17	28,79	15,24	13,46	2,22	16,51	7,28	5,32	1,89	35,57
S1-57-35-C	31,22				0,41				10,97				5,18			
S1-57-25-A	41,92				1,56				10,48				9,28			
S1-57-25-2	33,18	35,38	5,76	16,27	0,67	1,10	0,45	40,92	16,34	11,69	4,18	35,72	3,18	4,81	3,92	81,46
S1-57-25-C	31,06				1,06				8,26				1,97			
S1-57-15-A	40,02	38,90	1,57	4,04	0,68	0,91	0,34	36,71	6,51	4,25	3,20	75,26	2,92	2,07	1,20	58,01
S1-57-15-B	37,79				1,15				1,99				1,22			
S1-40-35-A	29,48				0,57				14,52				11,99			
S1-40-35-B	25,34	29,99	4,93	16,43	0,33	0,53	0,18	34,84	20,74	15,25	5,16	33,81	2,29	5,57	5,56	99,81
S1-40-35-C	35,16				0,69				10,50				2,44			
S1-40-25-A	36,08	36,08	–	–	0,86	0,86	–	–	4,92	4,92	–	–	2,41	2,41	–	–
S1-40-15-A	38,12				0,66				5,70				1,86			
S1-40-15-B	27,65	33,74	5,44	16,13	0,68	0,70	0,04	6,13	19,21	12,24	6,77	55,28	2,53	2,68	0,90	33,69
S1-40-15-C	35,46				0,75				11,82				3,64			
S1-30-35-A	34,25	34,79	0,75	2,17	1,02	0,82	0,29	35,74	4,67	3,66	1,42	38,83	2,09	1,93	0,22	11,12
S1-30-35-B	35,32				0,61				2,66				1,78			
S1-30-25-A	24,08				0,48				15,40				2,15			
S1-30-25-B	30,98	28,92	4,20	14,53	1,02	0,63	0,33	52,31	10,33	11,73	3,21	27,33	2,58	2,18	0,38	17,60
S1-30-25-C	31,68				0,41				9,46				1,82			
S1-30-15-A	27,19	29,80	3,69	12,38	0,33	0,47	0,19	41,52	18,13	15,68	3,46	22,05	1,72	1,67	0,07	4,46
S1-30-15-B	32,41				0,61				13,24				1,62			
S1-CTL-A	-				-				-				-			
S1-CTL-B	19,38	25,10	8,09	32,23	0,34	0,37	0,04	11,00	12,39	9,13	4,61	50,50	5,41	5,21	0,29	5,57
S1-CTL-C	30,82				0,40				5,87				5,00			

De modo geral, os resultados reforçam a distinção entre os comportamentos elástico e inelástico nas diferentes configurações geométricas. As variações observadas, especialmente nos deslocamentos adicionais, indicam que conectores com furos mais afastados das bordas ou mais espaçados entre si tendem a permitir maiores deformações no regime inelástico. Tais tendências serão analisadas graficamente a seguir, a fim de investigar possíveis padrões e implicações para o desempenho global dos conectores.

A Figura B.12 apresenta a variação da força no limite elástico ($Q_{lo.e}$) dos conectores da Série 1 em duas perspectivas complementares. Nos gráficos (a), (b) e (c), $Q_{lo.e}$ é analisado em função do espaçamento entre furos (S_h), para distâncias fixas entre os furos e a borda interna (S_b) de 35 mm, 25 mm e 15 mm, respectivamente. Já nos gráficos (d), (e) e (f), a variável independente passa a ser a distância entre os furos e a borda interna (S_b), considerando espaçamentos entre furos (S_h) fixos de 57 mm, 40 mm e 30 mm, respectivamente.

Nos gráficos (a) e (b), observa-se que os coeficientes de determinação (R^2) foram relativamente baixos, com valores de 0,24 e 0,53, respectivamente. Isso indica que não há uma relação bem definida entre S_h e $Q_{lo.e}$ nessas configurações. Já no gráfico (c), referente a $S_b = 15$ mm, o ajuste linear apresentou um excelente coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$), sugerindo uma forte tendência de aumento de $Q_{lo.e}$ com o incremento de S_h nesse caso específico. Ainda assim, essa observação deve ser feita com cautela, pois os gráficos (a) e (b) não confirmam essa mesma tendência.

Nos gráficos (d), (e) e (f), nos quais a análise é feita em função de S_b , o comportamento também foi variado. O gráfico (d), para $S_h = 57$ mm, apresentou um $R^2 = 1,00$, indicando uma forte tendência decrescente de $Q_{lo.e}$ com o aumento da distância dos furos à borda interna. No entanto, os gráficos (e) e (f) mostraram ajustes menos consistentes, com R^2 de 0,37 e 0,62, respectivamente, o que enfraquece a generalização do comportamento observado em (d). No caso de $S_h = 30$ mm (gráfico f), a tendência foi crescente, contrastando com o padrão decrescente visto em (d).

De modo geral, os resultados da Figura B.12 indicam que não há um padrão único e claro entre $Q_{lo.e}$ e os parâmetros geométricos S_h e S_b . As tendências observadas são pontuais e variam de acordo com a combinação das variáveis, sugerindo que o comportamento da força no limite elástico é influenciado por múltiplos fatores, além da geometria isolada. Análises complementares com agrupamentos e outros parâmetros podem ajudar a compreender melhor essas interações.

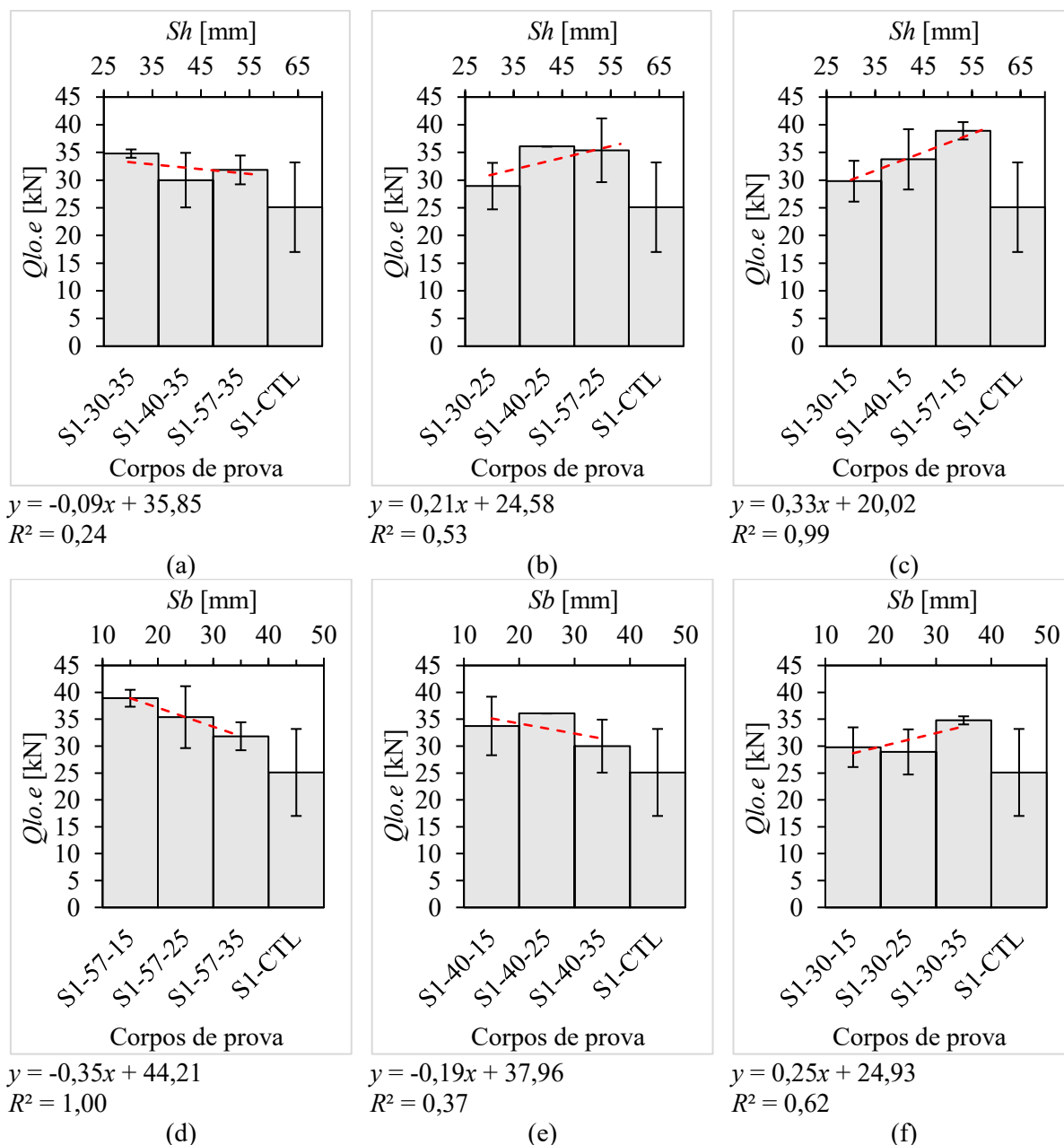


Figura B.12 – Variação da força no limite elástico ($Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação da força no limite elástico ($Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.

A Figura B.13 apresenta a variação do deslizamento no limite elástico ($S_{lo.e}$) em função dos parâmetros geométricos dos conectores da Série 1, considerando diferentes combinações entre o espaçamento entre furos (S_h) e a distância entre os furos e a borda interna do conector (S_b). Os gráficos (a), (b) e (c) avaliam $S_{lo.e}$ em função de S_h para S_b fixos em 35 mm, 25 mm e 15 mm, respectivamente. Os gráficos (d), (e) e (f) analisam $S_{lo.e}$ em função de S_b , para S_h fixos em 57 mm, 40 mm e 30 mm, respectivamente.

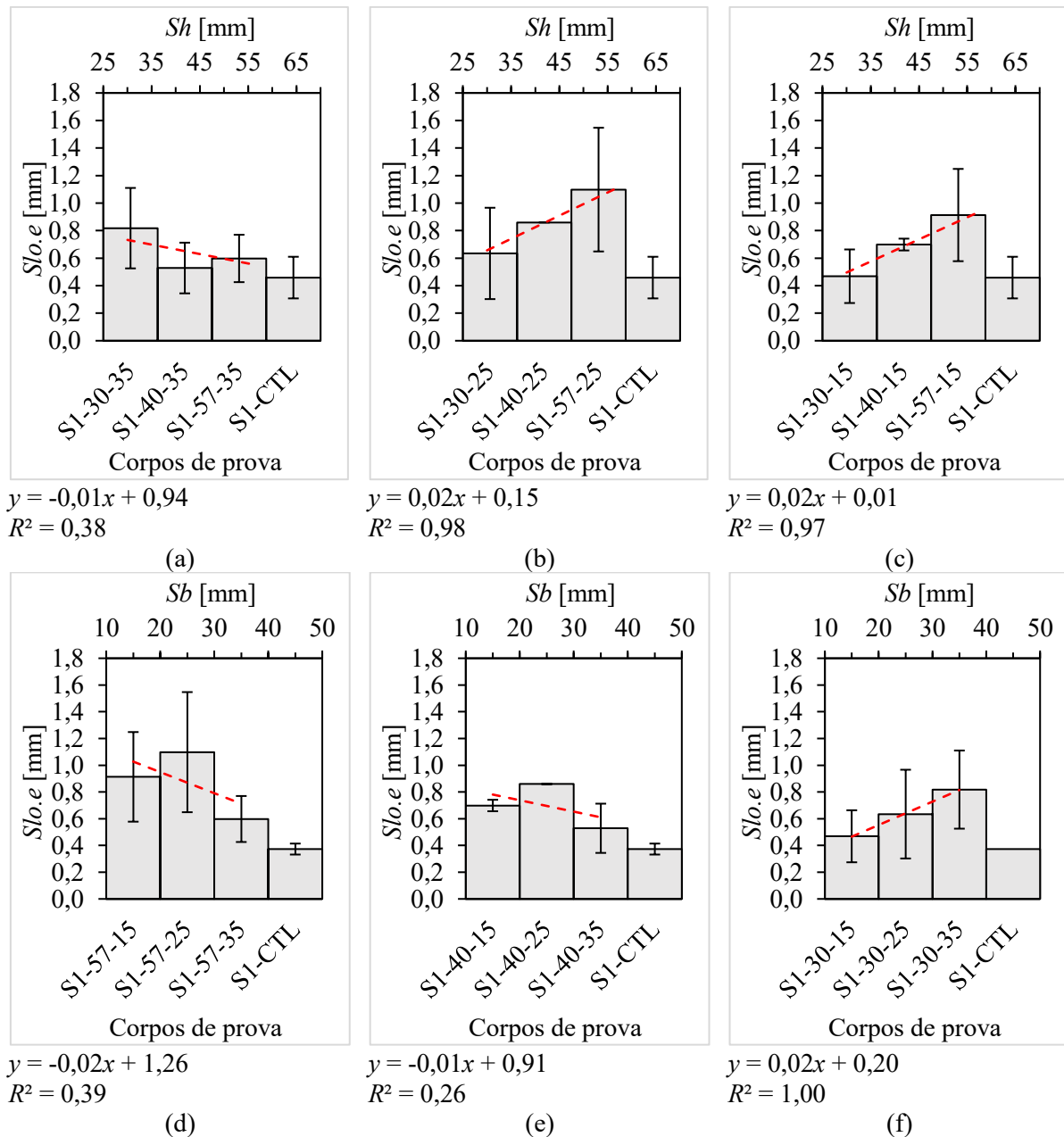


Figura B.13 – Variação do deslizamento no limite elástico ($S_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do deslizamento no limite elástico ($Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.

No gráfico (a), observa-se uma tendência levemente decrescente, representada pela equação $y = -0,01x + 0,94$, com $R^2 = 0,38$, indicando uma relação fraca entre o espaçamento entre furos e o deslizamento no regime elástico para $S_b = 35$ mm. Nos gráficos (b) e (c), no entanto, aparecem tendências crescentes mais bem definidas: $y = 0,02x + 0,15$ ($R^2 = 0,98$) e $y = 0,02x + 0,01$ ($R^2 = 0,97$), respectivamente. Esses resultados sugerem que, quando os furos estão mais próximos da borda interna ($S_b = 25$ mm e $S_b = 15$ mm), o aumento do espaçamento entre furos (S_h) leva a um incremento no deslizamento no regime elástico.

Essa tendência pode ser explicada pela formação de fissuras mais extensas no início da aplicação da força. Em furos próximos à borda interna, a fissuração tende a se desenvolver com maior previsibilidade e direcionamento, e quando os furos estão afastados entre si, a extensão da fissura se amplia, exigindo maior deslocamento relativo para alcançar o limite elástico.

No gráfico (f), a equação $y = 0,02x + 0,20$, com $R^2 = 1,00$, também indica uma tendência crescente. Nesse caso, com $S_b = 30$ mm fixo, o aumento de S_h está associado a maior $S_{lo.e}$. O comportamento sugere que furos mais próximos entre si (S_h menores), quando posicionados mais afastados da borda interna, resultam em menor deslizamento, enquanto furos mais afastados entre si (S_h maiores) levam a fissuras mais longas até atingir a borda, implicando maior deslocamento na fase elástica.

Nos gráficos (d) e (e), as equações $y = -0,02x + 1,26$ ($R^2 = 0,39$) e $y = -0,01x + 0,91$ ($R^2 = 0,26$) apontam tendências decrescentes muito suaves e sem correlação forte, sugerindo que, para S_h fixos de 57 mm e 40 mm, a variação de S_b não produziu um efeito sistemático sobre $S_{lo.e}$. Isso indica que, nessas configurações, o deslocamento no regime elástico é menos sensível à posição dos furos em relação à borda interna.

Em síntese, os gráficos (b), (c) e (f) revelaram as tendências mais consistentes, todas crescentes, com altos valores de R^2 (respectivamente 0,98, 0,97 e 1,00), sugerindo que, em determinadas condições geométricas, o espaçamento entre furos ou a distância à borda interna exerce influência direta sobre o deslizamento no regime elástico. No entanto, esses resultados devem ser interpretados com cautela, uma vez que os demais gráficos apresentaram correlações fracas ou ausentes, indicando que o comportamento não é generalizável e depende da interação entre S_h e S_b em cada configuração específica.

A Figura B.14 apresenta os gráficos da variação do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) em função das variáveis geométricas S_h e S_b , seguindo o mesmo formato de representação adotado nas figuras anteriores. Os gráficos (a), (b) e (c) analisam o comportamento de $\Delta Q_{lo.ie}$ com a variação do espaçamento entre furos (S_h), para distâncias fixas entre os furos e a borda interna ($S_b = 35$ mm, 25 mm e 15 mm, respectivamente). Os gráficos (d), (e) e (f), por sua vez, avaliam a influência da variação de S_b , com S_h mantidos constantes em 57 mm, 40 mm e 30 mm.

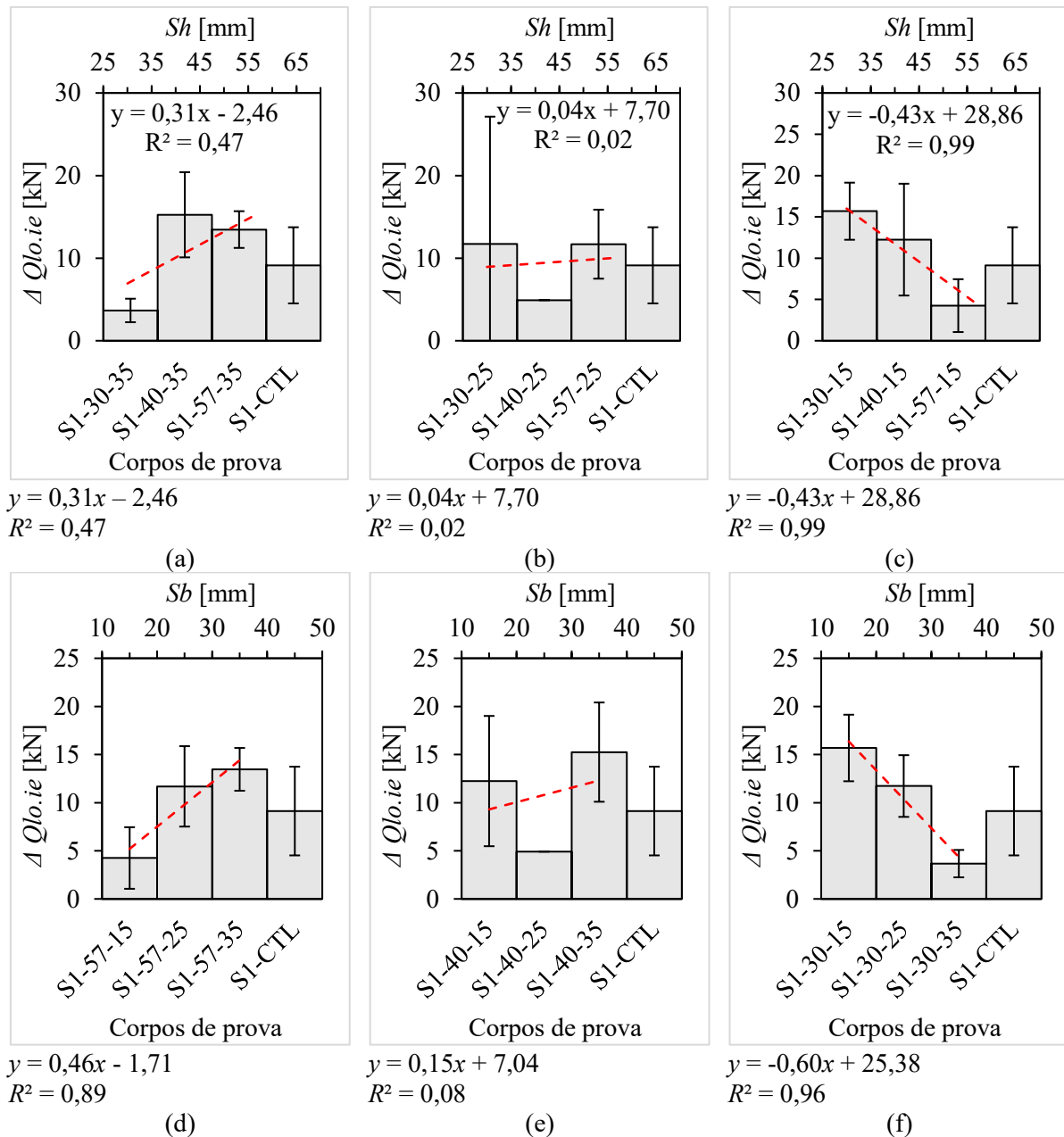


Figura B.14 – Variação do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.

De modo geral, não se identificou um padrão consistente ao longo dos seis gráficos. As Figura B.14b e Figura B.14e apresentaram coeficientes de determinação muito baixos ($R^2 = 0,02$ e $R^2 = 0,08$, respectivamente), com tendências praticamente nulas e comportamento disperso. As Figura B.14a e Figura B.14d exibiram tendências crescentes moderadas ($R^2 = 0,47$ e $R^2 = 0,89$, respectivamente), mas ainda com limitações para firmar conclusões generalizáveis.

Os destaques ficaram para os gráficos (c) e (f), que apresentaram os melhores ajustes estatísticos, com $R^2 = 0,99$ e $R^2 = 0,96$, ambos classificados como excelentes. Em ambos

os casos, observou-se uma tendência decrescente, indicando que o acréscimo de força no regime inelástico diminui à medida que os furos se afastam da borda interna (Figura B.14f) ou quando são mais afastados entre si (Figura B.14c).

Esse comportamento é consistente com o observado na Figura B.13, em que os mesmos gráficos (c) e (f) também apresentaram elevado coeficiente de determinação e tendências bem definidas. Ainda assim, ressalta-se que tais conclusões se aplicam especificamente a essas combinações geométricas e devem ser interpretadas com cautela, considerando a elevada variabilidade dos demais casos.

A Figura B.15 apresenta os gráficos da variação do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$) em função dos parâmetros geométricos dos conectores, estruturados nos mesmos moldes das figuras anteriores. As subfiguras (a), (b) e (c) mostram a variação de $\Delta S_{lo.ie}$ com o espaçamento entre furos (S_h), considerando S_b fixos em 35 mm, 25 mm e 15 mm, respectivamente. As subfiguras (d), (e) e (f), por sua vez, analisam o comportamento do mesmo parâmetro em função da distância entre os furos e a borda interna (S_b), para S_h fixos em 57 mm, 40 mm e 30 mm.

De modo geral, os resultados não apontam para um padrão bem estabelecido. As tendências observadas são predominantemente crescentes, mas os coeficientes de determinação (R^2) apresentam grande variação entre os gráficos. A Figura B.15b destacou-se com um R^2 de 0,91, enquanto a Figura B.15d apresentou R^2 de 0,86, ambos classificados como "muito bons", segundo os critérios adotados. Ainda assim, essas tendências devem ser interpretadas com cautela, uma vez que a maioria dos demais gráficos exibiu ajustes apenas moderados ou fracos, como na Figura B.15a ($R^2 = 0,55$), e na Figura B.15e ($R^2 = 0,68$) e, especialmente, na Figura B.15c ($R^2 = 0,07$) e na Figura B.15f ($R^2 = 0,27$), que indicam baixa correlação entre as variáveis.

Portanto, embora algumas combinações geométricas tenham apresentado coeficientes de determinação mais elevados, como nas Figura B.15b e Figura B.15d, os demais resultados mostram considerável dispersão, o que limita a possibilidade de generalizações. Assim, não é possível afirmar com segurança que exista uma relação direta entre os parâmetros geométricos analisados e o deslizamento no regime inelástico. Os dados sugerem que o comportamento é altamente sensível à interação entre S_h e S_b , exigindo análises complementares para maior robustez nas interpretações.

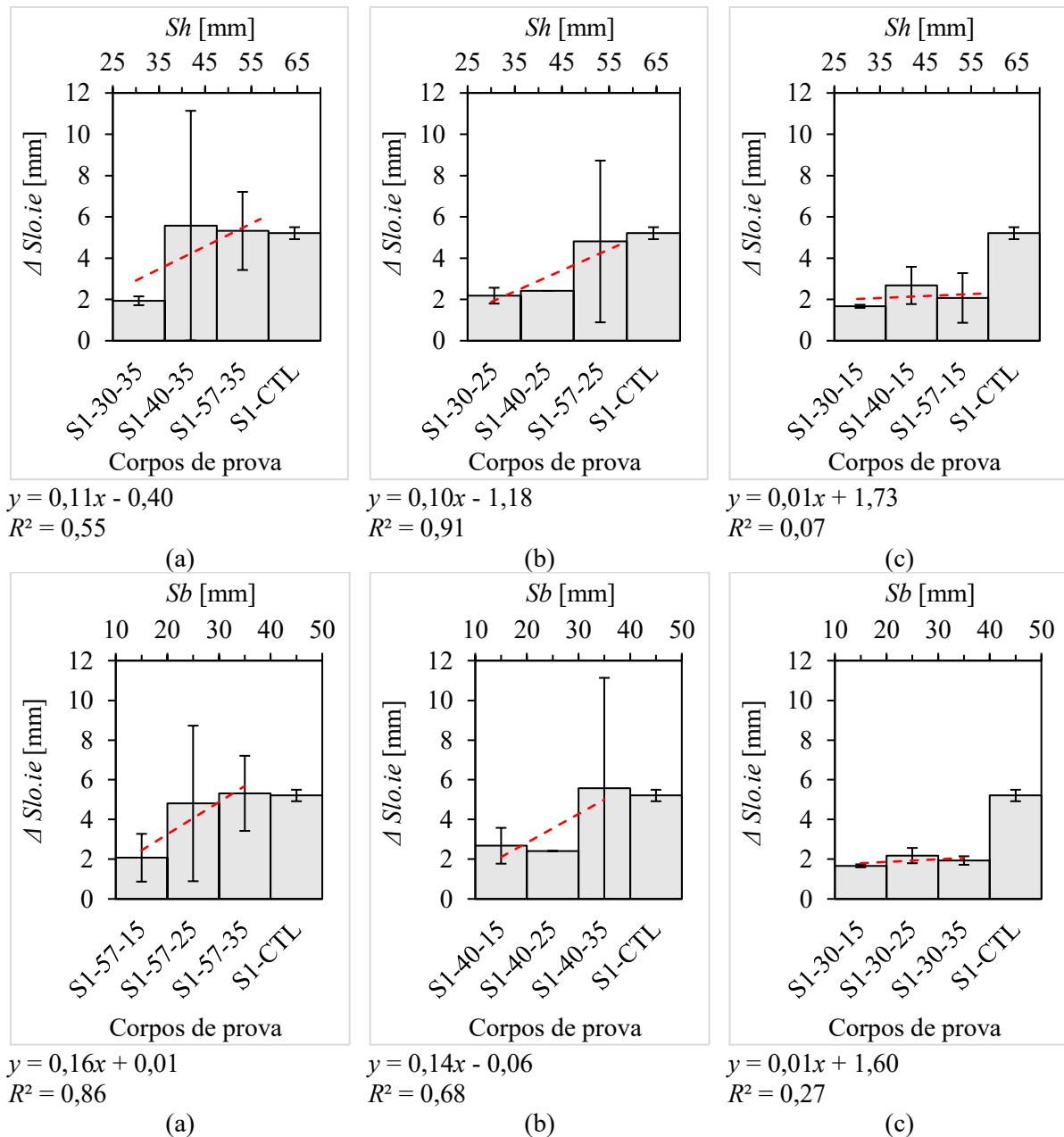


Figura B.15 – Variação do deslizamento no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos (S_h), para diferentes distâncias entre furos e borda interna (S_b): (a) 35 mm; (b) 25 mm; e (c) 15 mm; e variação do deslizamento no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.e}$) em função da distância entre furos e borda interna (S_b), para diferentes distâncias entre furos (S_h): (d) 57 mm; (e) 40 mm; e (f) 30 mm.

A Tabela B 8 consolida os resultados médios e estatísticos dos conectores da Série 1, agrupando os parâmetros $Q_{lo.e}$ (força no limite elástico), $S_{lo.e}$ (deslocamento correspondente), $\Delta Q_{lo.ie}$ (acréscimo de força no regime inelástico) e $\Delta S_{lo.ie}$ (acréscimo de deslocamento no regime inelástico) de acordo com o espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância entre os furos e a borda interna (S_b). O objetivo desta organização é avaliar com maior clareza os efeitos isolados de S_h sobre a transição do comportamento elástico para o inelástico.

Tabela B 8 – $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$, $\Delta Q_{lo,ie}$ e $\Delta S_{lo,ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v , agrupados por S_h , independentemente de S_b .

Código	$Q_{lo,e}$				$S_{lo,e}$				$\Delta Q_{lo,ie}$				$\Delta S_{lo,ie}$			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]
S1-57-35-A	34,69				0,63				14,17				3,50			
S1-57-35-B	29,59				0,75				15,24				7,28			
S1-57-35-C	31,22				0,41				10,97				5,18			
S1-57-25-A	41,92	34,93	4,52	12,95	1,56	0,86	0,37	42,78	10,48	10,50	4,84	46,07	9,28	4,32	2,75	63,81
S1-57-25-2	33,18				0,67				16,34				3,18			
S1-57-25-C	31,06				1,06				8,26				1,97			
S1-57-15-A	40,02				0,68				6,51				2,92			
S1-57-15-B	37,79				1,15				1,99				1,22			
S1-40-35-A	29,48				0,57				14,52				11,99			
S1-40-35-B	25,34				0,33				20,74				2,29			
S1-40-35-C	35,16				0,69				10,50				2,44			
S1-40-25-A	36,08	32,47	4,90	15,09	0,86	0,65	0,17	25,71	4,92	12,49	6,13	49,06	2,41	3,88	3,62	93,27
S1-40-15-A	38,12				0,66				5,70				1,86			
S1-40-15-B	27,65				0,68				19,21				2,53			
S1-40-15-C	35,46				0,75				11,82				3,64			
S1-30-35-A	34,25				1,02				4,67				2,09			
S1-30-35-B	35,32				0,61				2,66				1,78			
S1-30-25-A	24,08				0,48				15,40				2,15			
S1-30-25-B	30,98	30,85	3,96	12,83	1,02	0,64	0,28	43,57	10,33	10,55	5,57	52,78	2,58	1,96	0,33	16,97
S1-30-25-C	31,68				0,41				9,46				1,82			
S1-30-15-A	27,19				0,33				18,13				1,72			
S1-30-15-B	32,41				0,61				13,24				1,62			
S1-CTL-A	-				-				-				-			
S1-CTL-B	19,38	25,10	8,09	32,23	0,34	0,37	0,04	11,00	12,39	9,13	4,61	50,50	5,41	5,21	0,29	5,57
S1-CTL-C	30,82				0,40				5,87				5,00			

De modo geral, observa-se uma leve diferença entre os valores médios de $Q_{lo.e}$ conforme a variação de S_h . Os valores médios registrados foram: 34,93 kN para $S_h = 57$ mm, 32,47 kN para $S_h = 40$ mm e 30,85 kN para $S_h = 30$ mm. Essa redução pode sugerir que, à medida que os furos se aproximam entre si, a força no limite do regime elástico tende a ser ligeiramente menor, embora os coeficientes de variação moderados indiquem dispersão significativa nos dados.

No caso de $S_{lo.e}$, os deslocamentos mantiveram-se reduzidos em todas as configurações, refletindo a rigidez esperada da fase elástica. Os valores médios foram 0,86 mm ($S_h = 57$ mm), 0,65 mm ($S_h = 40$ mm) e 0,64 mm ($S_h = 30$ mm), com coeficientes de variação relativamente altos, especialmente para $S_h = 57$ mm ($c_v = 42,78\%$) e $S_h = 30$ mm ($c_v = 43,57\%$), o que demonstra sensibilidade do deslocamento a pequenas variações nas condições de ensaio ou geometria.

Quanto ao acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$), os valores médios foram 10,50 kN ($S_h = 57$ mm), 12,49 kN ($S_h = 40$ mm) e 10,55 kN ($S_h = 30$ mm). As diferenças entre os valores não configuram um padrão definido de variação com o espaçamento S_h . Além disso, as dispersões foram elevadas em todos os casos, com coeficientes de variação superiores a 45%, o que evidencia a forte influência de outros fatores geométricos ou experimentais sobre esse parâmetro.

Por fim, para o acréscimo de deslocamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$), os resultados médios foram: 4,32 mm ($S_h = 57$ mm), 3,88 mm ($S_h = 40$ mm) e 1,96 mm ($S_h = 30$ mm). Nota-se uma redução mais clara de $\Delta S_{lo.ie}$ com a diminuição de S_h , sugerindo que conectores com furos mais afastados entre si tendem a permitir maiores deformações após o limite elástico. No entanto, os coeficientes de variação também foram elevados, especialmente para $S_h = 40$ mm ($c_v = 93,27\%$) e $S_h = 57$ mm ($c_v = 63,81\%$), exigindo cautela na interpretação.

Esses resultados confirmam que o comportamento dos conectores após o limite elástico é sensível à geometria dos furos, mas também sofre forte influência de variações inerentes ao processo experimental. A análise gráfica a seguir poderá ajudar a identificar relações mais robustas entre as variáveis envolvidas.

A Figura B.16 apresenta a variação dos quatro parâmetros que caracterizam a transição entre os regimes elástico e inelástico dos conectores da Série 1, agrupados por espaçamento entre furos (S_h), independentemente da distância dos furos à borda interna (S_b). Os gráficos incluem: (a) a força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$), (b) o deslizamento correspondente ($S_{lo.e}$), (c) o acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) e (d) o acréscimo de deslocamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$).

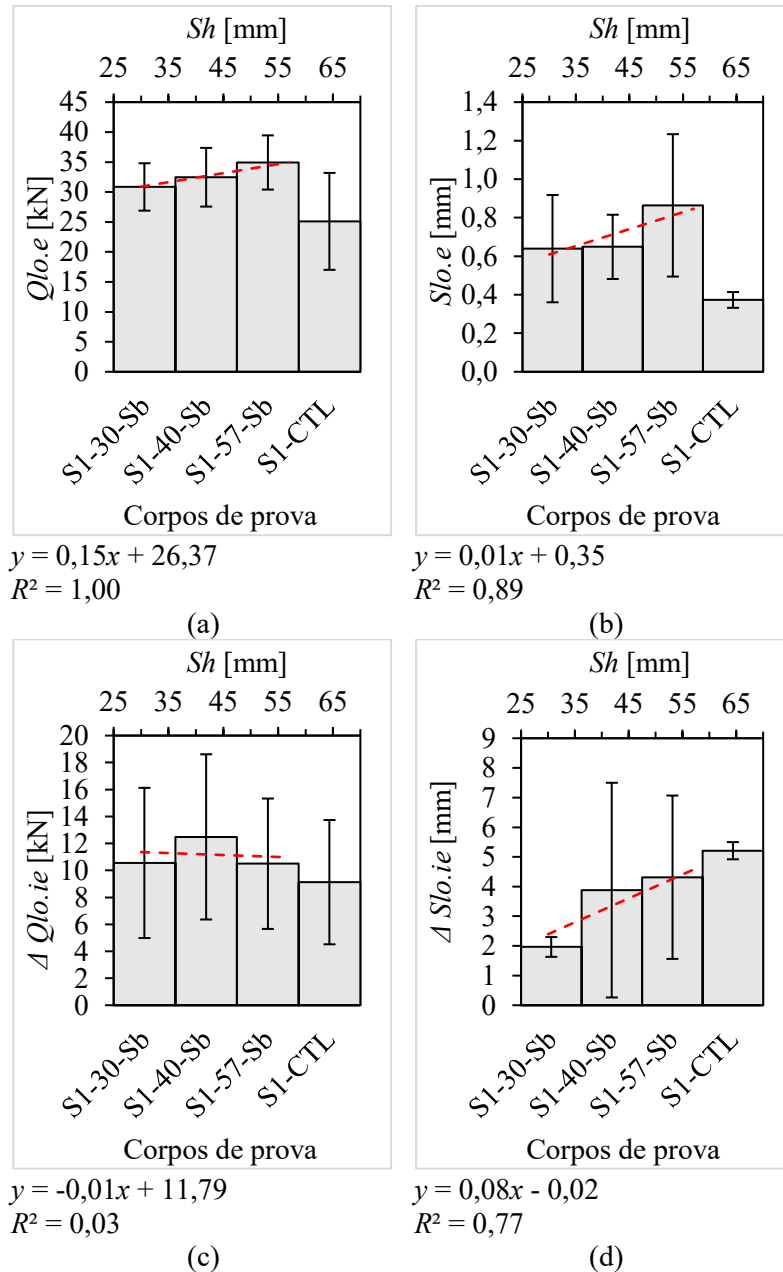


Figura B.16 – Variação (a) da força no limite do regime elástico ($Q_{lo,e}$); (b) do deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo,e}$); (c) do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$); e (d) do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 1, agrupados por S_h , independentemente de S_b .

Na Figura B.16a, observa-se um ajuste linear perfeito ($R^2 = 1,00$), com equação $y = 0,15x + 26,37$. Isso indica uma tendência consistente de aumento da força no limite elástico com o crescimento do espaçamento entre furos, reforçando os resultados obtidos na Tabela B 8. Esse comportamento sugere que conectores com S_h maior tendem a suportar valores mais elevados de força ainda dentro da fase elástica.

O deslizamento correspondente ($S_{lo,e}$), mostrado na Figura B.16b, também apresentou uma tendência de crescimento com o aumento de S_h , com equação $y = 0,01x + 0,35$

e coeficiente de determinação $R^2 = 0,89$. Esse resultado é classificado como "muito bom" e indica que, embora o deslocamento na fase elástica seja geralmente pequeno, há um leve aumento quando os furos são mais espaçados.

Na Figura B.16c, referente ao acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$), não foi observada uma tendência definida. A equação $y = -0,01x + 11,79$ apresentou um coeficiente de determinação bastante baixo ($R^2 = 0,03$), o que aponta ausência de correlação entre o espaçamento entre furos e esse parâmetro, mesmo após o agrupamento dos dados.

De modo geral, os gráficos derivados da Tabela B 8 apresentaram resultados mais consistentes em comparação com aqueles obtidos a partir das Tabela B.6 e Tabela B.7. O agrupamento por espaçamento entre furos (S_h) permitiu evidenciar tendências mais claras, especialmente para os parâmetros relacionados ao regime elástico ($Q_{lo.e}$ e $S_{lo.e}$), os quais exibiram excelente e muito bom coeficiente de determinação, respectivamente. Mesmo no caso do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$), foi possível observar um comportamento coerente ($R^2 = 0,77$), o que não ocorreu com a mesma clareza nas análises anteriores. Apenas o gráfico referente ao acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) não apresentou correlação significativa ($R^2 = 0,03$), reforçando que, embora o agrupamento tenha contribuído para melhorar a interpretação dos dados, a fase inelástica permanece sensível a variabilidades inerentes aos ensaios.

Dando continuidade à análise dos parâmetros que caracterizam o comportamento elástico e inelástico dos conectores, a Tabela B.9 apresenta os valores individuais e estatísticos de $Q_{lo.e}$, $S_{lo.e}$, $\Delta Q_{lo.ie}$ e $\Delta S_{lo.ie}$, agora agrupados por distância entre os furos e a borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre os furos (S_h). Essa organização complementa os agrupamentos apresentados na Tabela B 8, permitindo observar o impacto relativo de S_b sobre o comportamento dos conectores em diferentes fases do carregamento.

Em relação à força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$), os valores médios variaram de 31,88 kN ($S_b = 35$ mm) a 34,09 kN ($S_b = 15$ mm), com coeficientes de variação (c_v) entre 11,26% e 16,63%, o que indica boa repetibilidade entre réplicas para a maioria das configurações. Apesar da proximidade entre as médias, nota-se que a configuração com furos mais próximos da borda interna ($S_b = 15$ mm) foi ligeiramente superior às demais, sugerindo que essa condição pode favorecer uma maior resistência ainda dentro do regime elástico.

Tabela B.9 – $Q_{lo.e}$, $S_{lo.e}$, $\Delta Q_{lo.ie}$ e $\Delta S_{lo.ie}$ dos conectores da Série 1: valores individuais, médios, s e c_v , agrupados por S_b , independentemente de S_h .

Código	$Q_{lo.e}$				$S_{lo.e}$				$\Delta Q_{lo.ie}$				$\Delta S_{lo.ie}$			
	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]
S1-57-35-A	34,69				0,63				14,17				3,50			
S1-57-35-B	29,59				0,75				15,24				7,28			
S1-57-35-C	31,22				0,41				10,97				5,18			
S1-40-35-A	29,48	31,88	3,59	11,26	0,57	0,63	0,21	33,95	14,52	11,68	5,87	50,26	11,99	4,57	3,54	77,48
S1-40-35-B	25,34				0,33				20,74				2,29			
S1-40-35-C	35,16				0,69				10,50				2,44			
S1-30-35-A	34,25				1,02				4,67				2,09			
S1-30-35-B	35,32				0,61				2,66				1,78			
S1-57-25-A	41,92				1,56				10,48				9,28			
S1-57-25-2	33,18				0,67				16,34				3,18			
S1-57-25-C	31,06				1,06				8,26				1,97			
S1-40-25-A	36,08	32,71	5,44	16,63	0,86	0,87	0,40	45,90	4,92	10,74	3,98	37,04	2,41	3,34	2,66	79,51
S1-30-25-A	24,08				0,48				15,40				2,15			
S1-30-25-B	30,98				1,02				10,33				2,58			
S1-30-25-C	31,68				0,41				9,46				1,82			
S1-57-15-A	40,02				0,68				6,51				2,92			
S1-57-15-B	37,79				1,15				1,99				1,22			
S1-40-15-A	38,12				0,66				5,70				1,86			
S1-40-15-B	27,65	34,09	5,15	15,10	0,68	0,69	0,24	34,87	19,21	10,94	6,50	59,38	2,53	2,22	0,85	38,45
S1-40-15-C	35,46				0,75				11,82				3,64			
S1-30-15-A	27,19				0,33				18,13				1,72			
S1-30-15-B	32,41				0,61				13,24				1,62			
S1-CTL-A	-				-				-				-			
S1-CTL-B	19,38	25,10	8,09	32,23	0,34	0,37	0,04	11,00	12,39	9,13	4,61	50,50	5,41	5,21	0,29	5,57
S1-CTL-C	30,82				0,40				5,87				5,00			

Para o deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo.e}$), os valores médios oscilaram entre 0,63 mm ($S_b = 35$ mm) e 0,87 mm ($S_b = 25$ mm), com coeficientes de variação elevados, alcançando 45,90% em $S_b = 25$ mm. A maior média registrada em $S_b = 25$ mm pode indicar que essa configuração está associada a um maior deslocamento antes do início da fase inelástica, embora a elevada dispersão sugira cautela na interpretação dessa tendência.

O acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) variou entre 10,74 kN ($S_b = 25$ mm) e 11,68 kN ($S_b = 35$ mm), sem apresentar uma diferença significativa entre os grupos. Os coeficientes de variação foram elevados para todas as configurações, com destaque para $S_b = 35$ mm ($c_v = 50,26\%$) e $S_b = 15$ mm ($c_v = 59,38\%$), o que indica sensibilidade considerável desse parâmetro às variações geométricas e experimentais.

Por fim, os valores médios do acréscimo de deslocamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$) mostraram variação mais acentuada, indo de 2,22 mm ($S_b = 15$ mm) até 4,57 mm ($S_b = 35$ mm). Isso sugere que furos mais afastados da borda interna resultam em maiores deslocamentos adicionais após o fim do regime elástico. No entanto, a alta dispersão, especialmente para $S_b = 35$ mm ($c_v = 77,48\%$), reforça a necessidade de cautela ao se inferir relações diretas.

Em síntese, os agrupamentos por S_b permitiram destacar possíveis efeitos da posição dos furos em relação à borda interna sobre o desempenho mecânico dos conectores. Embora as tendências observadas sejam interessantes, os altos coeficientes de variação apontam que esses resultados devem ser interpretados com precaução, sendo posteriormente explorados com o apoio das representações gráficas que seguem.

A Figura B.17 apresenta os gráficos correspondentes aos valores médios dos conectores da Série 1 agrupados por distância entre furos e borda interna (S_b), independentemente do espaçamento entre furos (S_h), para os quatro parâmetros apresentados na Tabela B.9: força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$), deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo.e}$), acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) e acréscimo de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$).

Na Figura B.17a, observa-se uma tendência decrescente da força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$) com o aumento de S_b , representada pela equação $y = -0,11x + 35,65$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$. Esse resultado sugere que furos mais próximos da borda interna tendem a favorecer uma maior resistência dentro do regime elástico. O valor elevado de R^2 indica que essa tendência é fortemente sustentada pelos dados médios, reforçando o padrão já identificado na Tabela B.9.

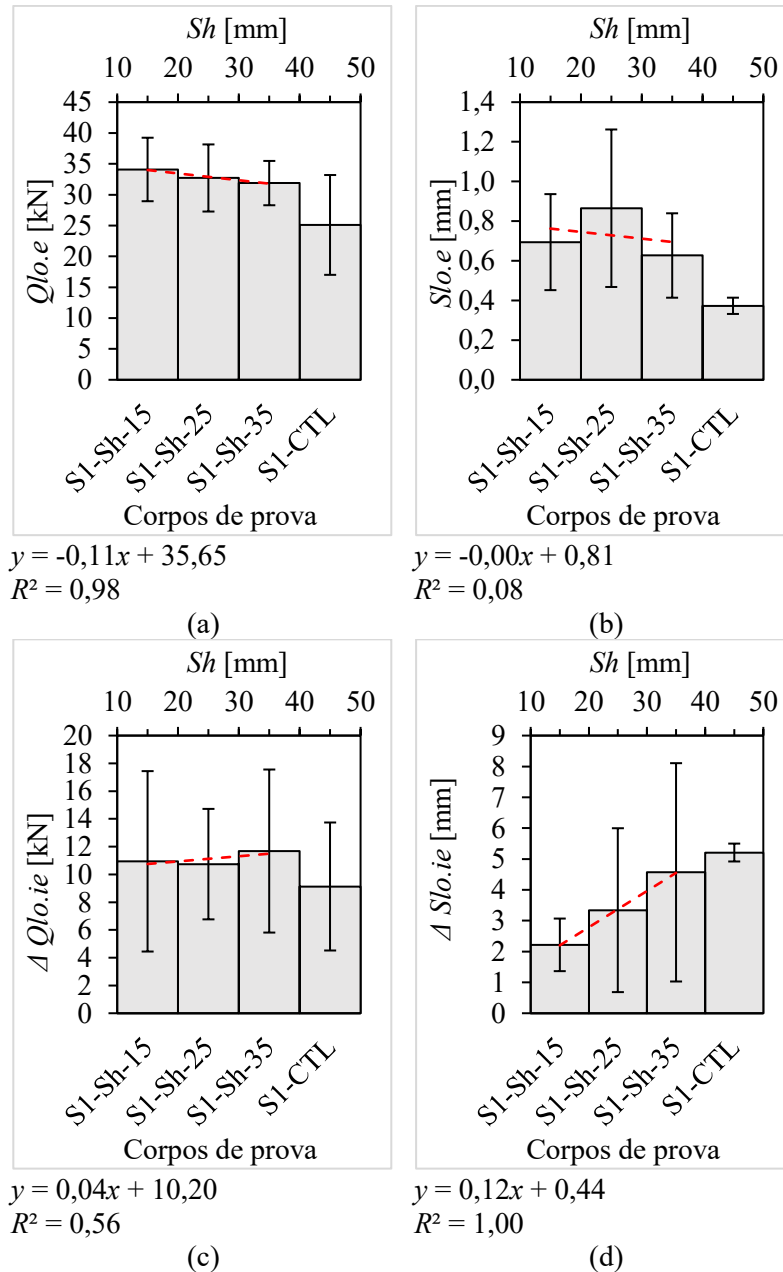


Figura B.17 – Variação da força no limite do regime elástico ($Q_{lo.e}$), do deslizamento no limite do regime elástico ($S_{lo.e}$), do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) e do deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$) dos conectores da Série 1, agrupados por S_b , independentemente de S_h .

A Figura B.17b, por sua vez, não indicou uma correlação significativa entre S_b e o deslizamento no limite elástico ($S_{lo.e}$), com a equação $y = -0,00x + 0,81$ e $R^2 = 0,08$. Esse resultado está em consonância com a elevada dispersão observada nos dados individuais, sugerindo que esse parâmetro é pouco influenciado pela variação da distância dos furos à borda interna.

Na Figura B.17c, o acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) apresenta uma tendência crescente com o aumento de S_b , descrita pela equação $y = 0,04x + 10,20$ e coeficiente $R^2 = 0,56$. Embora o ajuste não seja tão expressivo quanto o observado para $Q_{lo.e}$, a correlação

pode indicar uma leve influência positiva da distância à borda sobre a resistência adicional desenvolvida na fase inelástica.

Finalmente, a Figura B.17d destaca-se com uma tendência crescente muito bem definida para o acréscimo de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo.ie}$), com equação $y = 0,12x + 0,44$ e coeficiente de determinação $R^2 = 1,00$. Esse resultado sugere fortemente que quanto maior a distância entre os furos e a borda interna, maior o deslocamento adicional observado após o fim da linearidade da curva.

Em comparação com a Figura B.16, os resultados da Figura B.17 são mais variados: enquanto $Q_{lo.e}$ (Figura B.17a) e $\Delta S_{lo.ie}$ (Figura B.17d) apresentaram excelente ajuste, $S_{lo.e}$ (Figura B.17b) não evidenciou padrão significativo, e $\Delta Q_{lo.ie}$ (Figura B.17c) mostrou correlação moderada. Já na Figura B.16, todos os parâmetros, exceto $\Delta Q_{lo.ie}$ (Figura B.17c), mostraram ajustes mais consistentes. Essa comparação indica que a variável S_h teve efeito mais uniforme sobre os parâmetros analisados, enquanto os efeitos de S_b parecem mais concentrados em $Q_{lo.e}$ e $\Delta S_{lo.ie}$.

Série 2

Coeficiente de rigidez elástico

A rigidez elástica (K_e) dos conectores foi determinada por meio de regressão linear da curva força–deslocamento, limitada até um valor fracionário da força máxima, definido pelo fator de delimitação do regime elástico (α). Esse procedimento, descrito no item 3.5, tem por objetivo identificar o trecho da curva em que a resposta do sistema permanece predominantemente linear, sem ocorrência significativa de fissuração, deslizamento relativo ou redistribuições internas de esforço. O parâmetro K_e representa, portanto, a inclinação desse trecho elástico. Como referência adicional, também foi considerada a rigidez inicial (K_f), definida pela razão entre força e deslocamento no ponto correspondente a 70% da força máxima ($0,70 \cdot Q_{lo.u}$).

A Tabela B.10 apresenta os valores de α , do coeficiente de determinação (R^2) e da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2. Em grande parte dos casos, o fator α foi igual a 1,00, o que indica que o trecho linear da curva se estendeu até a força máxima, caracterizando um comportamento essencialmente elástico até o colapso. Esse padrão é observado nos conectores S2-FRP, S2-FRP-EA, S2-FRP-RH e S2-CTL, os quais apresentaram também elevados valores de R^2 (acima de 0,95), confirmando a predominância de um regime elástico bem definido e de boa qualidade de ajuste.

A comparação entre os valores de K_e e K_f reforça essa constatação. No conector S2-FRP, K_e foi de 13,30 kN/mm, enquanto K_f foi de 14,11 kN/mm (diferença inferior a 6%). No S2-CTL, K_e foi de 11,65 kN/mm e K_f de 13,18 kN/mm. Já no conector S2-FRP-RH, o valor médio de K_e foi de 10,52 kN/mm, contra 11,77 kN/mm para K_f , também com boa proximidade. Esses resultados demonstram que, nos modelos com aderência preservada e sem modificações substanciais nos mecanismos resistentes, o comportamento elástico é bem estabelecido e pouco sensível ao critério adotado para o cálculo da rigidez.

Nos modelos em que $\alpha < 1,00$, como o S2-FRP-EA/RH ($\alpha_{\text{médio}} = 0,80$) e o S2-A36-EA ($\alpha_{\text{médio}} = 0,66$), foi possível identificar a existência de um patamar de transição entre os regimes elástico e plástico. Ainda assim, os valores de K_e mantiveram-se próximos aos de K_f , indicando que, mesmo com a redução do trecho linear, a resposta inicial não apresentou redução abrupta. No S2-FRP-EA/RH, K_e foi de 1,89 kN/mm e K_f de 1,71 kN/mm; no S2-A36-EA, K_e foi de 16,99 kN/mm e K_f de 14,20 kN/mm. Isso demonstra que os mecanismos resistentes desses conectores, embora distintos, ainda forneceram rigidez inicial relativamente estável.

Por fim, destaca-se o coeficiente de variação (c_v) nos resultados de K_e . Valores baixos foram observados nos conectores S2-FRP-RH ($c_v = 11,4\%$) e S2-CTL ($c_v = 4,7\%$), evidenciando boa repetibilidade experimental. Em contrapartida, o S2-FRP-EA/RH apresentou dispersão elevada ($c_v = 50,5\%$), refletindo a maior variabilidade associada à eliminação da aderência e à substituição do concreto nos furos por barras metálicas. Esses resultados reforçam a influência da configuração geométrica e das propriedades de interface na linearidade e na estabilidade do comportamento inicial dos conectores.

Tabela B.10 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S2-FRP-A	1,00				0,98				15,85			
S2-FRP-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,98	0,01	1,11	12,42	13,30	2,25	16,89
S2-FRP-C	1,00				0,99				11,62			
S2-FRP-EA-A	1,00				0,95				2,70			
S2-FRP-EA-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,97	0,01	1,35	3,54	2,81	0,67	23,99
S2-FRP-EA-C	1,00				0,98				2,20			
S2-FRP-RH-A	1,00				0,97				11,82			
S2-FRP-RH-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,98	0,98	0,01	0,54	9,44	10,52	1,20	11,40
S2-FRP-RH-C	1,00				0,97				10,31			
S2-FRP-EA/RH-A	0,79				1,00				1,77			
S2-FRP-EA/RH-B	1,00	0,80	0,20	25,12	0,97	0,99	0,01	1,42	1,01	1,89	0,96	50,47
S2-FRP-EA/RH-C	0,60				0,99				2,91			
S2-A36-EA-A	0,62				0,99				17,03			
S2-A36-EA-B	0,63	0,66	0,06	8,39	0,97	0,98	0,01	0,87	19,75	16,99	2,78	16,36
S2-A36-EA-C	0,72				0,99				14,19			
S2-CTL-A	1,00				0,96				11,82			
S2-CTL-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,96	0,01	1,19	12,09	11,65	0,54	4,67
S2-CTL-C	1,00				0,95				11,04			

A Figura B.18 apresenta visualmente os valores médios da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2, com barras de erro representando os respectivos desvios-padrão. Observa-se que os conectores S2-FRP, S2-CTL e S2-FRP-RH mantiveram rigidez elástica média superior a 10 kN/mm, com variações relativamente pequenas, corroborando a boa linearidade observada nas curvas força–deslizamento desses modelos. Já os conectores com modificações mais expressivas, como S2-FRP-EA/RH e S2-FRP-EA, apresentaram os menores valores médios de K_e , abaixo de 3 kN/mm, além de maior dispersão. O conector S2-A36-EA, apesar do fator α reduzido, apresentou uma rigidez elástica elevada (≈ 17 kN/mm), comportamento compatível com a maior rigidez do aço em comparação ao GFRP. O gráfico destaca, portanto, a sensibilidade do parâmetro K_e às alterações nos mecanismos resistentes, sendo possível identificar claramente os efeitos da eliminação da aderência, da presença ou ausência de ancoragem nos furos e do tipo de material presente nesses furos, concreto ou aço, sobre a resposta elástica inicial dos conectores.

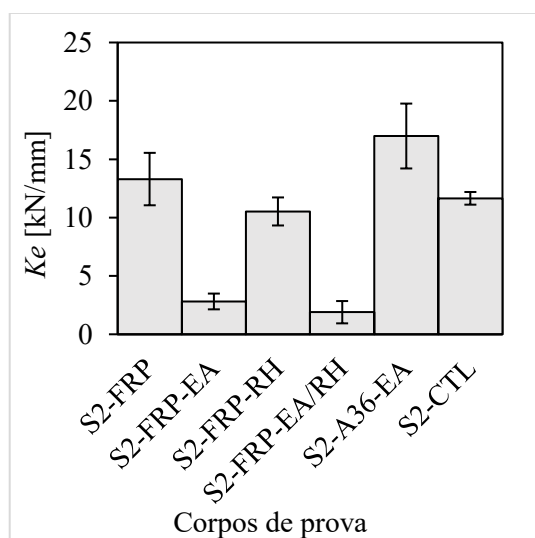


Figura B.18 – Rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 2.

Coefficiente de rigidez inelástico

Para os conectores da Série 2 em que foi possível identificar, com base no procedimento descrito no item 3.5, um trecho intermediário entre o regime elástico e a força máxima, foi calculado o coeficiente de rigidez inelástico (K_{ie}). Esse parâmetro foi obtido por meio de regressão linear entre os pontos correspondentes a $\alpha \cdot Q_{lo,u}$ (limite do regime elástico) e Q_{lu} (capacidade última), com o objetivo de quantificar a perda progressiva de rigidez à medida que o sistema se aproxima da ruptura. O valor de K_{ie} fornece uma medida da rigidez residual

no intervalo inelástico, refletindo as características de transição entre o comportamento predominantemente elástico e a fase plástica final.

A Tabela B.11 apresenta os resultados de K_{ie} e dos respectivos coeficientes de determinação (R^2) para os conectores S2-FRP-EA/RH e S2-A36-EA, únicos modelos da Série 2 em que houve delimitação clara do regime inelástico com base no critério de $\alpha < 1,00$. No conector S2-FRP-EA/RH, a rigidez inelástica média foi de 0,38 kN/mm, com coeficiente de variação elevado (79,8%), refletindo a instabilidade da resposta nesse intervalo e a sensibilidade associada à eliminação da aderência e à presença de barras de aço nos furos. Já no conector S2-A36-EA, observou-se maior consistência nos resultados ($K_{ie} = 1,02$ kN/mm, $c_v = 23,6\%$) e coeficientes de determinação superiores a 0,94, indicando um trecho inelástico bem ajustado e com degradação mais gradual da rigidez. Esses achados evidenciam que os mecanismos resistentes envolvidos (incluindo o tipo de material dos conectores e o modo de ancoragem) influenciam diretamente a estabilidade e o comportamento da estrutura no intervalo anterior à ruptura.

Tabela B.11 – Estimativa da rigidez inelástica (K_e) dos conectores da Série 2 por regressão linear até capacidade última ($Q_{lo,u}$): valores de K_e e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	R^2				K_{ie}			
	x_n	x	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	x [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S2-FRP-EA/RH-A	0,93				0,17			
S2-FRP-EA/RH-B	-	0,95	0,03	3,03	-	0,38	0,30	79,78
S2-FRP-EA/RH-C	0,97				0,59			
S2-A36-EA-A	0,94				1,12			
S2-A36-EA-B	0,96	0,96	0,02	1,72	1,20	1,02	0,24	23,56
S2-A36-EA-C	0,97				0,75			

Capacidade de carga no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de carga no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico

Com o intuito de aprofundar a caracterização do comportamento mecânico dos conectores, além dos parâmetros tradicionais de força máxima, rigidez e energia, foram avaliadas as propriedades associadas à transição entre os regimes elástico e inelástico. O procedimento de extração desses parâmetros, descrito no item 3.5, baseou-se na aplicação de um fator de delimitação do regime elástico (α), previamente adotado para o cálculo da rigidez elástica (K_e). A partir desse limite, foram obtidos os seguintes valores: força correspondente ao fim do regime elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no mesmo ponto ($S_{lo,e}$), acréscimo de força no regime inelástico até a capacidade última ($\Delta Q_{lo,ie} = Q_{lo,u} - Q_{lo,e}$) e acréscimo de deslocamento

no mesmo intervalo ($\Delta S_{lo.ie} = S_{lo.u} - S_{lo.e}$). Tais parâmetros são relevantes para descrever a transição mecânica dos conectores, especialmente no que se refere à redistribuição de esforços, ductilidade e evolução da deformação até o colapso. Assim como observado no tópico 0, apenas os conectores S2-FRP-EA/RH e S2-A36-EA apresentaram comportamento com fase inelástica bem definida. No caso do S2-FRP-EA/RH, uma das réplicas (amostra B) não apresentou trecho inelástico claramente identificável, razão pela qual foi desconsiderada na análise.

A Tabela B.12 resume os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação obtidos para os conectores S2-FRP-EA/RH e S2-A36-EA. O conector S2-FRP-EA/RH apresentou força média no limite elástico ($Q_{lo.e}$) de 12,62 kN, equivalente a cerca de 70% da sua força máxima. O deslizamento correspondente ($S_{lo.e}$) foi de 5,86 mm, com alta variabilidade ($c_v \approx 45\%$). O acréscimo de força até o colapso foi de 5,67 kN, com deslocamento adicional médio de 17,49 mm. Esse comportamento reflete a elevada deformabilidade proporcionada por essa configuração, em que a ausência de aderência permite maior mobilidade relativa, enquanto as barras metálicas atravessando os furos criam uma ancoragem eficaz, que transfere os esforços diretamente ao GFRP, induzindo sua fissuração e intensificando a deformação até a ruptura.

Por outro lado, o conector S2-A36-EA apresentou força média no limite elástico de 19,86 kN ($\approx 66\%$ da sua capacidade última), deslizamento médio de 1,20 mm e baixa dispersão ($c_v \approx 23\%$). O acréscimo de força foi de 10,39 kN e o deslocamento adicional de 10,29 mm, também com baixo coeficiente de variação ($\approx 7,5\%$). Como esse modelo foi concebido para induzir a ruptura ao concreto, é coerente que o trecho inelástico esteja associado a fissuras que se iniciam no concreto nos furos e se espalham para o restante do elemento de concreto armado, sem ocorrência de falha no conector metálico, levando a peça a se deformar e o conector a se movimentar.

Esses resultados evidenciam que a configuração geométrica e os mecanismos resistentes predominantes em cada modelo influenciam significativamente a distribuição dos esforços entre os regimes elástico e inelástico: enquanto o S2-A36-EA combina alta resistência com transição gradual, o S2-FRP-EA/RH apresenta maior deformabilidade pós-elástica, embora com capacidade limitada e maior dispersão dos resultados.

Tabela B.12 – Força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 2: valores individuais, valores médios, desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).

Código	$Q_{lo,e}$				$S_{lo,e}$				$\Delta Q_{lo,ie}$				$\Delta S_{lo,ie}$			
	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN]	x [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	x [mm]	s [mm]	c_v [%]
S2-FRP-EA/RH-A	13,68				7,75				3,64				21,99			
S2-FRP-EA/RH-B	-	12,62	1,50	11,85	-	5,86	2,66	45,41	-	5,67	2,88	50,77	-	17,49	6,36	36,38
S2-FRP-EA/RH-C	11,57				3,98				7,71				12,99			
S2-A36-EA-A	17,69				1,04				10,84				9,70			
S2-A36-EA-B	20,42	19,86	1,95	9,81	1,03	1,20	0,27	23,00	11,99	10,39	1,86	17,94	10,00	10,29	0,77	7,51
S2-A36-EA-C	21,46				1,51				8,35				11,16			

Série 3

Coeficiente de rigidez elástico

O presente tópico apresenta os valores estimados da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 3, obtidos por meio de regressão linear aplicada ao trecho inicial da curva força versus deslizamento relativo, limitado pelo fator $\alpha \cdot Q_{lo.u.}$. A Tabela B.13 mostra os resultados para K_e , os respectivos valores de α e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos em cada ajuste.

De modo geral, o fator α foi igual a 1,00 na maior parte dos casos, indicando que o comportamento permaneceu aproximadamente linear até o pico de força. Pequenas reduções em α foram observadas em alguns conectores S3-2 e S3-8 (mínimo de 0,76), o que revela uma leve curvatura da resposta antes do máximo, exigindo delimitação do trecho elástico. Os valores de R^2 foram consistentemente altos, variando entre 0,97 e 1,00, o que demonstra excelente qualidade dos ajustes lineares realizados e reforça a confiabilidade da metodologia.

Em relação ao coeficiente K_e , não se observou uma tendência clara com a variação da espessura do enrijecedor. O valor médio mais alto foi obtido para o conector S3-8 (14,22 kN/mm), seguido por S3-4 (13,62 kN/mm), mas outros conectores como S3-2 (13,71 kN/mm) e S3-0 (11,10 kN/mm) também apresentaram valores próximos, com variações dentro de faixas que não sugerem correlação evidente com a geometria. Embora a ausência de tendência clara dificulte interpretações diretas, a identificação desse comportamento também é relevante, pois indica que a rigidez elástica do sistema não é sensivelmente afetada pela variação de espessura do reforço, ao contrário do que se observa para outros parâmetros mecânicos.

Comparando os valores de K_e com os coeficientes de rigidez inicial K_f apresentados na Tabela 4.21, nota-se que ambos apresentam magnitudes semelhantes, com diferenças relativamente pequenas. Por exemplo, para o conector S3-0, K_e foi de 11,10 kN/mm e K_f de 11,77 kN/mm; para o S3-2, K_e foi de 13,71 kN/mm e K_f de 14,19 kN/mm; no S3-4, K_e foi de 13,62 kN/mm e K_f de 15,15 kN/mm; já no S3-6, K_e foi de 11,46 kN/mm e K_f de 12,75 kN/mm; e no S3-8, K_e foi de 14,22 kN/mm e K_f de 14,72 kN/mm.

Essas variações ocorrem porque o parâmetro K_e é obtido por meio de regressão linear até o limite do regime elástico, definido com base no fator $\alpha \cdot Q_{lo.u.}$, enquanto o valor de K_f é calculado diretamente como a razão entre 70% da força máxima e o deslizamento correspondente. Como o valor de α foi, na maioria dos casos, próximo ou igual a 1,00, ou seja, superior a 0,70, os dois pontos de avaliação se referem a trechos semelhantes da curva, o que

explica a proximidade entre os valores de K_e e K_f . Ainda assim, pequenas diferenças podem surgir em razão do método de obtenção: K_e resulta de um ajuste por regressão, enquanto K_f decorre de um ponto específico da curva. Dessa forma, a análise comparativa entre ambos os parâmetros contribui para validar a consistência dos resultados e reforçar a confiabilidade na estimativa da rigidez elástica dos conectores.

Tabela B.13 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 3 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S3-0-A	1,00				0,99				12,28			
S3-0-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,98	0,99	0,01	0,56	9,84	11,10	1,23	11,04
S3-0-C	1,00				0,99				11,19			
S3-2-A	1,00				0,99				11,85			
S3-2-B	0,84	0,91	0,08	8,99	1,00	0,99	0,00	0,37	14,91	13,71	1,64	11,94
S3-2-C	0,89				1,00				14,38			
S3-4-A	1,00				0,98				16,21			
S3-4-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,98	0,01	0,93	12,62	13,62	2,26	16,60
S3-4-C	1,00				0,99				12,03			
S3-6-A	1,00				0,97				11,95			
S3-6-B	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,98	0,01	1,19	8,47	11,46	2,77	24,14
S3-6-C	1,00				0,98				13,94			
S3-8-A	0,76				0,99				17,89			
S3-8-A	0,90	0,89	0,12	13,60	0,99	0,99	0,00	0,27	13,17	14,22	3,27	23,02
S3-8-A	1,00				0,99				11,60			

A Figura B.19 apresenta a variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) em função da espessura do enrijecedor nos conectores da Série 3, com modelos de regressão polinomial e linear. Ambos os modelos apresentaram baixos coeficientes de determinação, $R^2 = 0,22$ para a regressão polinomial ($y = -0,13x^2 + 1,15x + 10,75$) e $R^2 = 0,19$ para a linear ($y = 0,40x + 11,63$), indicando ausência de tendência clara entre K_e e a variação da espessura do reforço. Esses resultados corroboram a análise estatística da Tabela B.13, que já apontava para uma dispersão sem padrão definido, o que reforça a conclusão de que o enrijecimento da região exposta do conector não influencia de forma sistemática a rigidez elástica medida por esse parâmetro.

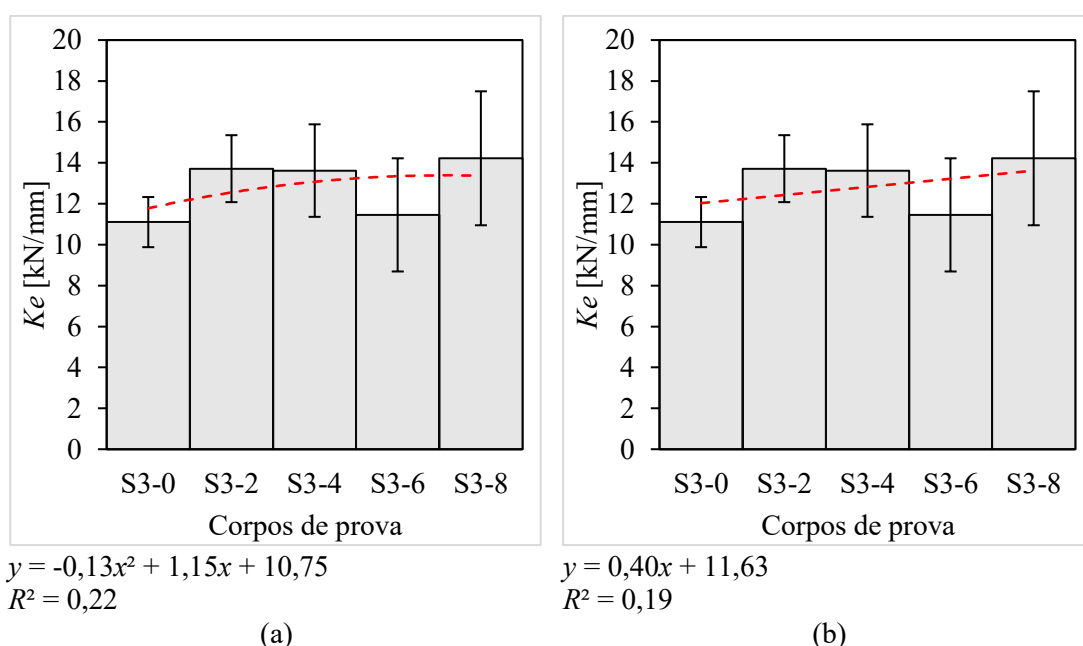


Figura B.19 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 3 em função da espessura do enrijecedor (0 mm a 8 mm), modelados por meio de regressão: (a) polinomial; e (b) linear.

Coeficiente de rigidez inelástico

O presente tópico apresenta os valores do coeficiente K_{ie} , estimado por meio de regressão linear aplicada ao trecho ascendente da curva força versus deslizamento relativo, compreendido entre o fim do regime elástico (definido pelo fator $\alpha \cdot Q_{lo,u}$) e a força máxima ($Q_{lo,u}$). Conforme mostra a Tabela B.14, a análise pôde ser conduzida apenas para os conectores S3-2 e S3-8, cujas curvas apresentaram um trecho inelástico suficientemente bem definido para esse tipo de ajuste. Os valores médios obtidos foram 1,64 kN/mm para o conector S3-2 e 1,22 kN/mm para o S3-8. Os coeficientes de determinação R^2 , variando entre 0,84 e 0,96, indicam qualidade satisfatória dos ajustes realizados. Vale destacar, contudo, o elevado coeficiente de variação observado em S3-2 (37,21%), refletindo maior dispersão entre as réplicas.

O que se pode afirmar, no entanto, é que esse comportamento foi identificado tanto no conector com menor espessura de enrijecimento (2 mm) quanto naquele com a maior espessura (8 mm), sugerindo que a presença de um trecho inelástico ascendente pode ser um comportamento suscetível de ocorrer em configurações com valores extremos de espessura de reforço, embora não se observe uma tendência sistemática em relação à espessura do enrijecedor.

Tabela B.14 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 3 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	R^2				K_{ie}			
	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S3-2-A	-				-			
S3-2-B	0,84	0,86	0,03	3,89	2,07	1,64	0,61	37,21
S3-2-C	0,89				1,21			
S3-8-A	0,96				1,35			
S3-8-A	0,92	0,94	0,03	3,24	1,09	1,22	0,18	14,85
S3-8-A	-				-			

Capacidade de carga no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de carga no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico

O presente tópico apresenta os resultados dos parâmetros extraídos a partir da segmentação da curva força versus deslizamento relativo, conforme definido no protocolo adotado para esta pesquisa. Mesmo que a análise tenha sido possível apenas para dois conectores da Série 3 (S3-2 e S3-8, ambos com duas réplicas válidas), foi mantido o procedimento estabelecido, garantindo a aplicação sistemática dos critérios metodológicos.

A Tabela B.15 traz os valores da força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), do deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), do acréscimo de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e do acréscimo de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$). Nota-se que os conectores S3-2 apresentaram resultados mais consistentes e com menor dispersão entre as réplicas, com coeficientes de variação que permaneceram abaixo de 7% para $Q_{lo,e}$, $S_{lo,e}$ e $\Delta S_{lo,ie}$. Por outro lado, os conectores S3-8 exibiram dispersão significativamente maior em todos os parâmetros, com destaque para $\Delta Q_{lo,ie}$ ($c_v = 51,18\%$) e $S_{lo,e}$ ($c_v = 39,01\%$), o que indica variações expressivas de comportamento entre as amostras.

De modo geral, os valores médios observados para os parâmetros avaliados nos conectores S3-2 e S3-8 foram relativamente próximos, apesar da diferença nos níveis de dispersão. Por exemplo, a força no limite elástico ($Q_{lo,e}$) apresentou médias de 19,99 kN para o

S3-2 e 18,00 kN para o S3-8; o deslizamento correspondente ($S_{lo,e}$) foi de 1,36 mm no S3-2 e 1,21 mm no S3-8. Já os acréscimos de força e deslizamento no regime inelástico também mostraram certa semelhança nas médias: $\Delta Q_{lo,ie} = 3,17$ kN e 3,55 kN, e $\Delta S_{lo,ie} = 1,94$ mm e 2,83 mm, respectivamente. Esses valores indicam que, apesar da variabilidade nas réplicas do S3-8, a resposta média entre as duas configurações foi comparável, sugerindo que a espessura do enrijecimento pode não influenciar de forma marcante esses parâmetros quando considerados apenas em termos médios, embora tenha afetado negativamente a estabilidade e a repetibilidade da resposta mecânica no caso do S3-8.

Tabela B.15 – Força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 3: valores individuais, valores médios, desvios-padrão (s) e coeficientes de variação (c_v).

Código	$Q_{lo,e}$				$S_{lo,e}$				$\Delta Q_{lo,ie}$				$\Delta S_{lo,ie}$			
	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	c_v [%]	x_n [kN]	$\bar{x}$ [kN]	s [kN]	c_v [%]	x_n [mm]	$\bar{x}$ [mm]	s [mm]	c_v [%]
S3-2-A	-				-				-				-			
S3-2-B	20,90	19,99	1,29	6,47	1,40	1,36	0,05	3,89	3,98	3,17	1,15	36,23	1,92	1,94	0,02	1,05
S3-2-C	19,07				1,33				2,36				1,95			
S3-8-A	15,68				0,88				4,83				3,58			
S3-8-A	20,33	18,00	3,29	18,27	1,54	1,21	0,47	39,01	2,26	3,55	1,81	51,18	2,07	2,83	1,07	37,76
S3-8-A	-				-				-				-			

Série 4

Em relação aos parâmetros complementares avaliados na Série 4, verificou-se que alguns deles não puderam ser determinados porque a metodologia de cálculo não retornou valores correspondentes. Essa ausência de resultados está associada ao próprio comportamento das curvas força–deslocamento obtidas nos ensaios, nas quais determinados trechos característicos simplesmente não se manifestaram. Dessa forma, a inexistência de valores para alguns parâmetros não deve ser interpretada como uma limitação decorrente do número de réplicas realizadas, mas sim como uma característica inerente às respostas experimentais observadas.

Coeficiente de rigidez elástico

A Tabela B.16 apresenta os resultados da estimativa do coeficiente de rigidez elástico (K_e) dos conectores da Série 4, obtido por regressão linear aplicada até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$). Os resultados mostram que a maioria das réplicas apresentou valor de α igual a 1, ou seja, o trecho utilizado para estimativa de K_e coincidiu com a totalidade do trecho ascendente linear da curva. No entanto, algumas réplicas exigiram a adoção de um fator α inferior a 1, indicando a necessidade de limitar o intervalo para garantir o comportamento essencialmente elástico na regressão. Isso ocorreu nos conectores S4-19-1-B ($\alpha = 0,79$), S4-16-3-B ($\alpha = 0,73$) e S4-13-3-C ($\alpha = 0,65$).

Em termos de ajuste, os coeficientes de determinação (R^2) foram altos em todos os casos, variando entre 0,95 e 0,99, o que demonstra a qualidade da aproximação linear adotada para definição de K_e . Esse bom ajuste reforça a confiabilidade dos valores obtidos e a adequação do método baseado no fator de delimitação do regime elástico.

Com relação à dispersão dos valores de K_e , a maioria dos conectores apresentou coeficientes de variação moderados a baixos, como no caso do grupo controle S4- C_{TL} ($c_v = 4,67\%$) e do conector S4-19-2 ($c_v = 17,27\%$). No entanto, os conectores S4-19-1 ($c_v = 31,97\%$) e, principalmente, S4-13-3 ($c_v = 54,51\%$) apresentaram dispersões mais elevadas, possivelmente associadas à menor quantidade de furos (no caso do S4-19-1) e ao menor diâmetro (no caso do S4-13-3), o que pode intensificar variações locais no comportamento mecânico.

Por fim, ao comparar os valores de K_e com os coeficientes de rigidez inicial (K_f) apresentados na Tabela B.16, observa-se boa concordância entre ambos os parâmetros. Por exemplo, no conector S4-19-2, K_e foi de 11,42 kN/mm, enquanto K_f foi de 12,26 kN/mm; no S4-16-3, K_e foi de 12,81 kN/mm e K_f de 13,54 kN/mm; já no conector S4-19-3, K_e foi de

13,30 kN/mm e K_f de 14,11 kN/mm. Essa proximidade ocorre porque, nos casos em que o fator α foi igual a 1, o trecho utilizado para a obtenção de K_e abrange toda a fase ascendente linear da curva força versus deslizamento. Como o K_f é calculado com base em 70% da capacidade última ($Q_{lo,u}$), ele se apoia em um trecho ainda contido dentro da região essencialmente elástica, o que resulta em valores compatíveis entre os dois parâmetros. Esses resultados reforçam a consistência dos métodos adotados e a confiabilidade das estimativas de rigidez para os diferentes modelos de conectores.

Tabela B.16 – Estimativa da rigidez elástica (K_e) dos conectores da Série 3 por regressão linear até o limite definido pelo fator de delimitação do regime elástico ($\alpha \cdot Q_{lo,u}$): valores de K_e , do fator de delimitação do regime elástico (α) e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	α				R^2				K_e			
	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n	$\bar{x}$	s	c_v [%]	x_n [kN/mm]	$\bar{x}$ [kN/mm]	s [kN/mm]	c_v [%]
S4-CTL-A	1,00				0,96				11,82			
S4-CTL-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,96	0,01	1,19	12,09	11,65	0,54	4,67
S4-CTL-C	1,00				0,95				11,04			
S4-19-1-A	1,00				0,96				9,48			
S4-19-1-B	0,79	0,93	0,12	13,04	0,99	0,98	0,01	1,52	16,06	11,73	3,75	31,97
S4-19-1-C	1,00				0,98				9,66			
S4-19-2-A	1,00				0,98				13,03			
S4-19-2-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,96	0,97	0,01	0,99	12,01	11,42	1,97	17,27
S4-19-2-C	1,00				0,97				9,22			
S4-19-3-A	1,00				0,98				15,85			
S4-19-3-B	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,98	0,01	1,11	12,42	13,30	2,25	16,89
S4-19-3-C	1,00				0,99				11,62			
S4-13-3-A	1,00				0,96				8,79			
S4-13-3-B	1,00	0,88	0,20	22,88	0,98	0,98	0,02	1,65	12,34	15,26	8,32	54,51
S4-13-3-C	0,65				0,99				24,64			
S4-16-3-A	1,00				0,96				11,98			
S4-16-3-B	0,73	0,91	0,16	17,13	0,99	0,97	0,02	1,72	15,89	12,81	2,76	21,55
S4-16-3-C	1,00				0,97				10,56			

A Figura B.20 apresenta a variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 4 em função da quantidade de furos (Figura B.20a), do diâmetro dos furos (Figura B.20b) e da área de perfuração (Figura B.20c), por meio de gráficos de barras que indicam os valores médios e as respectivas barras de erro, baseadas nos desvios-padrão. Os coeficientes de determinação obtidos foram $R^2 = 0,60$ para a quantidade de furos, $R^2 = 0,57$ para o diâmetro dos furos e $R^2 = 0,51$ para a área de perfuração, o que indica correlações medianas.

Entretanto, a expressiva dispersão dos dados, visível nas barras de erro, inviabiliza a identificação de tendências claras entre as variáveis geométricas e a rigidez elástica dos conectores. Essa dispersão pode estar associada a fatores como variações de alinhamento e posicionamento durante a montagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios, além da própria heterogeneidade dos materiais utilizados. Tanto o concreto quanto o GFRP são materiais compósitos que apresentam variabilidade intrínseca em sua composição, o que pode afetar significativamente os resultados mecânicos obtidos, especialmente em parâmetros de resposta inicial como o K_e .

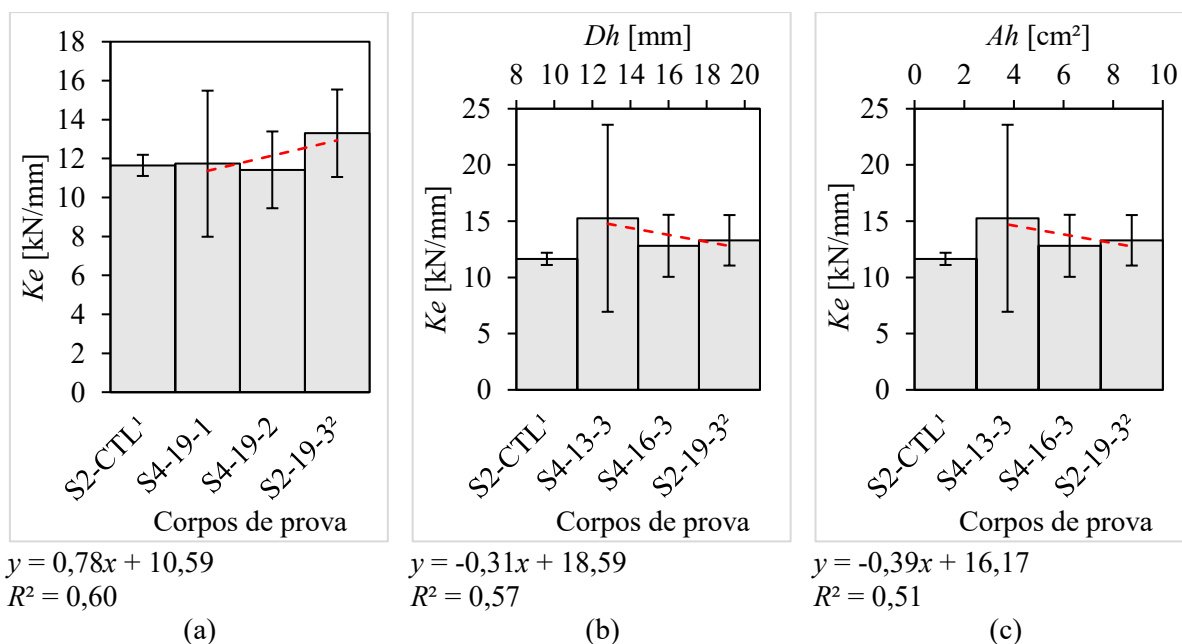


Figura B.20 – Variação do coeficiente de rigidez elástico (K_e) nos conectores da Série 4 em função da: (a) quantidade de furos; (b) diâmetro dos furos (D_h); e (c) área de perfuração (A_h).

Coeficiente de rigidez inelástico

O presente tópico apresenta os resultados da rigidez inelástica (K_{ie}) obtidos por regressão linear nos conectores da Série 4, conforme mostrado na Tabela B.0.17. Apenas três configurações apresentaram condições adequadas para o cálculo de K_{ie} : S4-19-1, S4-13-3 e S4-

16-3. Todas essas configurações são caracterizadas por possuírem poucos furos (S4-19-1) ou furos de menor diâmetro (S4-13-3 e S4-16-3).

Apesar da limitação no número de resultados, apenas uma réplica por configuração, o protocolo de apresentação foi mantido, e os valores estimados de K_{ie} foram acompanhados dos respectivos coeficientes de determinação (R^2), todos com valores elevados. Isso indica que, mesmo com poucos dados, os trechos analisados apresentam comportamento linear bem definido no regime pós-limite elástico. Ainda assim, devido à reduzida amostragem, os resultados não permitem inferências comparativas mais amplas e devem ser interpretados com cautela, servindo apenas como referência pontual dentro do conjunto analisado.

Tabela B.0.17 – Estimativa da rigidez inelástica (K_{ie}) dos conectores da Série 3 por regressão linear: valores de K_{ie} e do coeficiente de determinação (R^2).

Código	x_n	
	R^2	K_{ie} [kN/mm]
S4-19-1-B	0,87	0,70
S4-13-3-C	0,98	4,78
S4-16-3-B	0,99	2,45

Capacidade de força no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de força no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico

O tópico “Capacidade de força no limite do regime elástico, deslocamento no limite do regime elástico, acréscimo de força no regime inelástico e acréscimo de deslocamento no regime inelástico” apresenta resultados para apenas três conectores da Série 4: S4-19-1-B, S4-13-3-C e S4-16-3-B. Conforme já apontado no tópico anterior, trata-se de um conjunto bastante limitado de amostras, com apenas uma réplica por configuração. Essa limitação inviabiliza a formulação de conclusões generalizáveis ou a realização de análises estatísticas. Ainda assim, os valores foram incluídos na Tabela B.0.18 a fim de registrar tecnicamente os dados disponíveis e garantir a completude do protocolo metodológico adotado.

Tabela B.0.18 – Valores individuais de força no limite elástico ($Q_{lo,e}$), deslizamento no limite elástico ($S_{lo,e}$), variação de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo,ie}$) e variação de deslizamento no regime inelástico ($\Delta S_{lo,ie}$) dos conectores da Série 4.

Código	$Q_{lo,e}$	$S_{lo,e}$	$\Delta Q_{lo,ie}$	$\Delta S_{lo,ie}$
	x_n [kN]	x_n [mm]	x_n [kN]	x_n [mm]
S4-19-1-B	22,35	1,39	5,94	8,52
S4-13-3-C	17,33	0,70	9,33	1,95
S4-16-3-B	17,41	1,10	6,44	2,63

Conclusões

Na Série 1, a rigidez elástica (K_e) apresentou relação com S_h ($R^2 = 0,99$), com média de 55,06 kN/mm para $S_h = 30$ mm, 52,49 kN/mm para $S_h = 40$ mm e 45,99 kN/mm para $S_h = 57$ mm. Já S_b não mostrou influência clara ($R^2 = 0,03$). O conector S1- C_{TL} foi destaque, com K_e de 58,86 kN/mm. No regime inelástico, a rigidez (K_{ie}) variou entre 1,73 e 9,36 kN/mm, com maior rigidez nos conectores com furos mais próximos ($S_h = 30$ mm: 5,55 kN/mm) e mais afastados da borda ($S_b = 15$ mm: 4,63 kN/mm). Os ajustes lineares foram muito bons ($R^2 = 0,99$). Ainda em relação à Série 1, a força no limite elástico ($Q_{lo.e}$) aumentou com S_h ($R^2 = 1,00$), enquanto o deslizamento correspondente ($S_{lo.e}$) foi sempre inferior a 1,10 mm e também apresentou correlação ($R^2 = 0,89$). O incremento de força no regime inelástico ($\Delta Q_{lo.ie}$) teve comportamento instável, sem correlação com S_h ($R^2 = 0,03$). Já o incremento de deslocamento ($\Delta S_{lo.ie}$) decresceu com a redução de S_h ($R^2 = 0,77$). Quando analisado por S_b , observou-se que a força no limite elástico caiu com o aumento da distância à borda ($R^2 = 0,98$), enquanto o deslocamento mostrou padrão indefinido ($R^2 = 0,08$).

A avaliação da Série 2 demonstrou que a rigidez elástica e inelástica refletiu a atuação dos mecanismos resistentes. Os modelos com aderência preservada, como S2-FRP ($K_e = 13,30$ kN/mm; $K_f = 14,11$ kN/mm) e S2- C_{TL} ($K_e = 11,65$ kN/mm; $K_f = 13,18$ kN/mm), apresentaram rigidez inicial mais elevada. Por outro lado, o conector S2-FRP-EA/RH mostrou valores bastante reduzidos ($K_e = 1,89$ kN/mm) e comportamento inelástico instável ($K_{ie} = 0,38$ kN/mm, $c_v \approx 80\%$). O modelo metálico S2-A36-EA, por sua vez, manteve rigidez elevada ($K_e = 16,99$ kN/mm; $K_{ie} = 1,02$ kN/mm), com $\alpha = 0,66$.

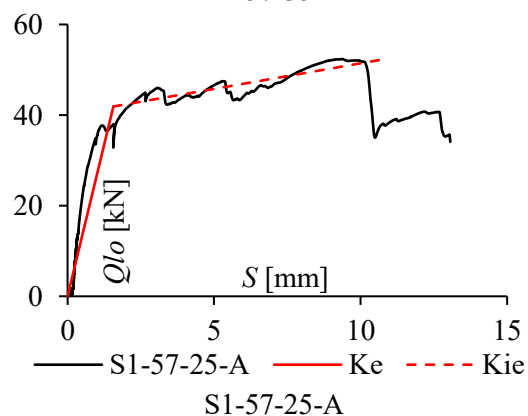
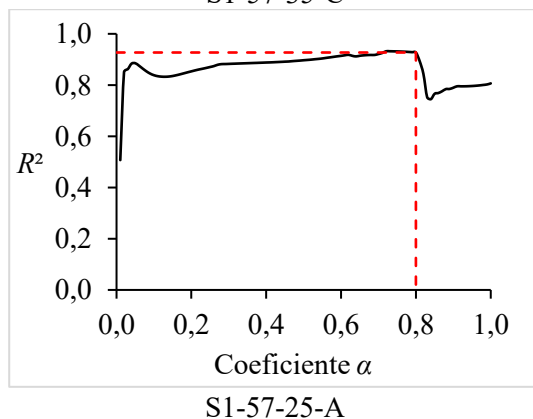
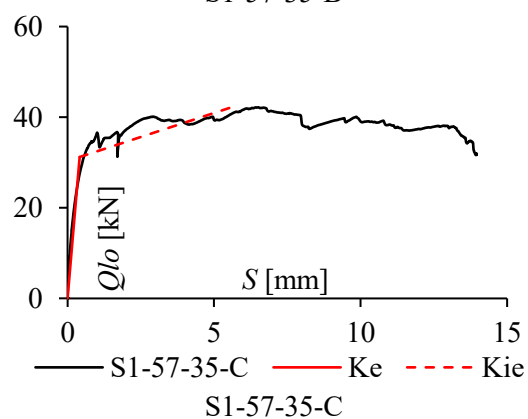
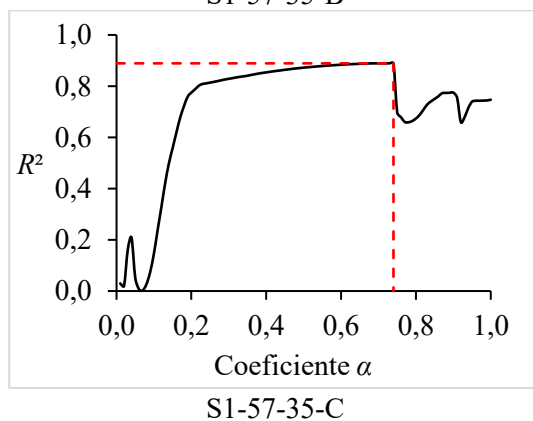
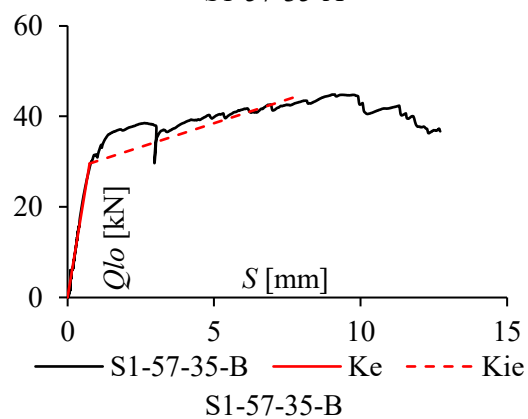
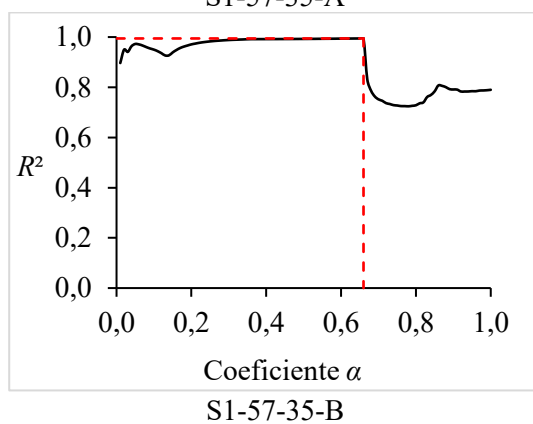
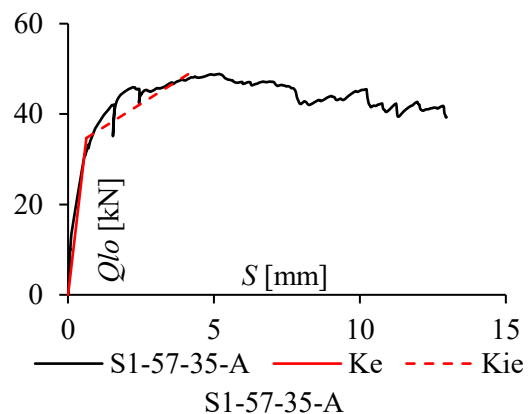
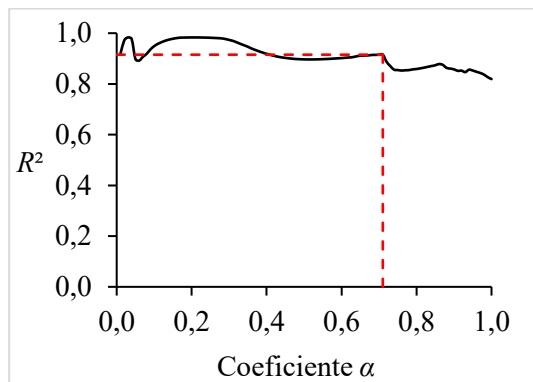
A análise da Série 3 indicou que os valores de rigidez elástica (K_e) variaram entre 11,10 kN/mm (S3-0) e 14,22 kN/mm (S3-8), mas não apresentaram tendência clara em função da espessura do enrijecedor ($R^2 < 0,22$). A rigidez inelástica (K_{ie}) pôde ser determinada apenas para os modelos S3-2 (1,64 kN/mm) e S3-8 (1,22 kN/mm), com dispersões distintas, elevada em S3-2 ($c_v = 37\%$) e mais controlada em S3-8 ($c_v = 15\%$). Nos parâmetros que definem a transição do regime elástico para o inelástico, o modelo S3-2 apresentou desempenho mais estável ($Q_{lo.e} = 19,99$ kN; $S_{lo.e} = 1,36$ mm; $\Delta Q_{lo.ie} = 3,17$ kN; $\Delta S_{lo.ie} = 1,94$ mm). Já o S3-8 teve variabilidade acentuada, especialmente em $\Delta Q_{lo.ie}$ ($c_v = 51\%$), indicando comportamento mecânico menos confiável.

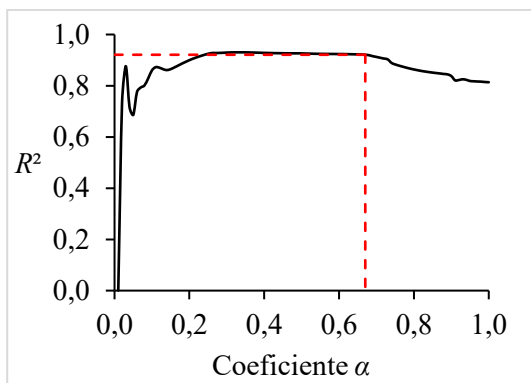
A análise da Série 4 mostrou que os coeficientes de rigidez elástica (K_e) variaram de 11,42 kN/mm a 13,30 kN/mm e apresentaram boa concordância com os valores de rigidez inicial (K_f), com coeficientes de determinação elevados ($R^2 \geq 0,95$). Em alguns casos, no entanto, foi necessário adotar um fator de delimitação do regime elástico (α) inferior a 1,

sinalizando o início antecipado da não linearidade. A análise estatística indicou correlação moderada entre K_e e o número de furos ($R^2 = 0,60$). Já a rigidez inelástica (K_{ie}), avaliada em um número limitado de amostras, variou entre 0,70 kN/mm e 4,78 kN/mm, com ajustes satisfatórios, mas sem base suficiente para generalizações mais amplas.

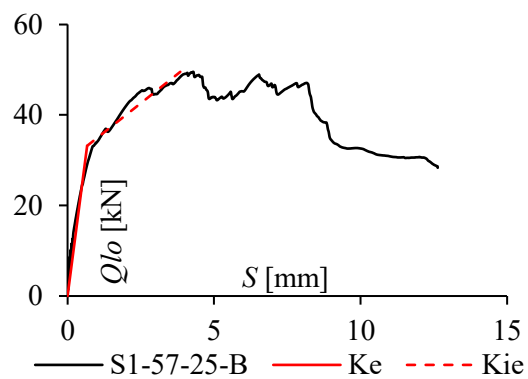
APÊNDICE C: GRÁFICOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS COMPLEMENTARES

Série 1

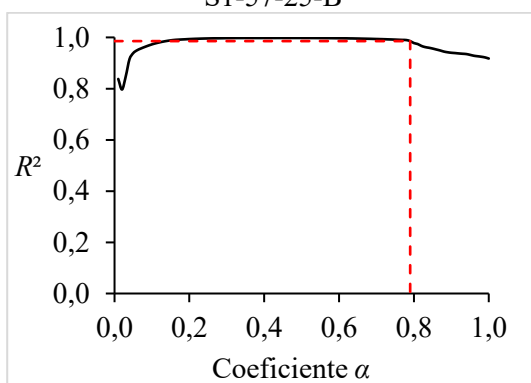




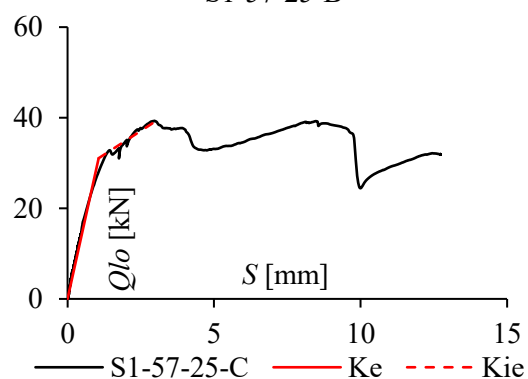
S1-57-25-B



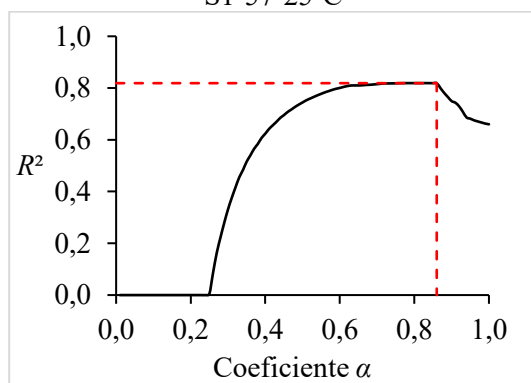
S1-57-25-B



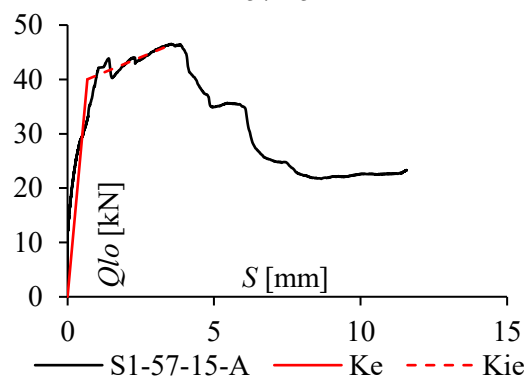
S1-57-25-C



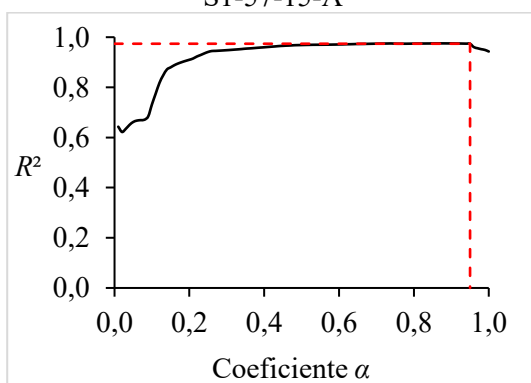
S1-57-25-C



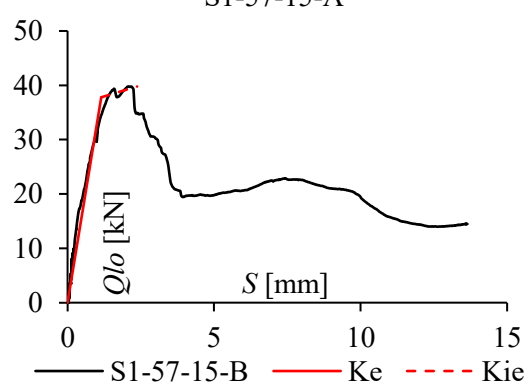
S1-57-15-A



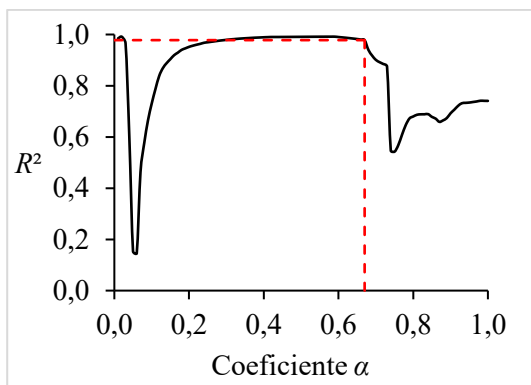
S1-57-15-A



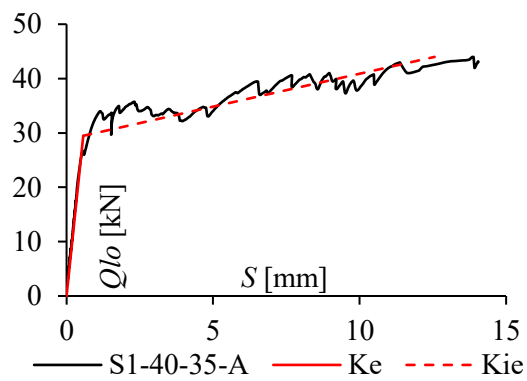
S1-57-15-B



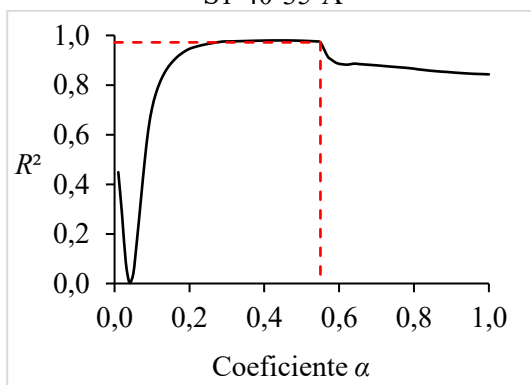
S1-57-15-B



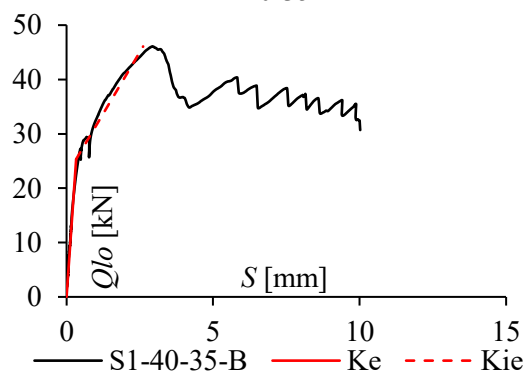
S1-40-35-A



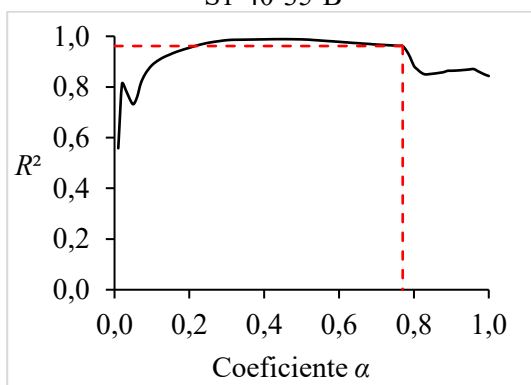
S1-40-35-A



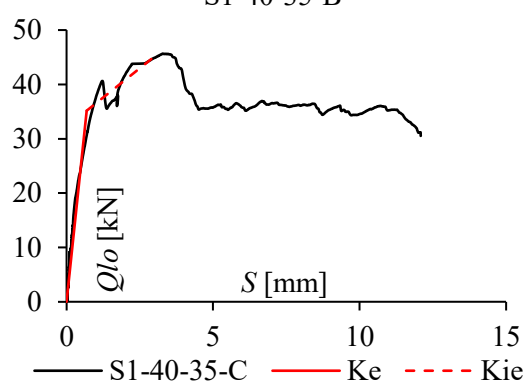
S1-40-35-B



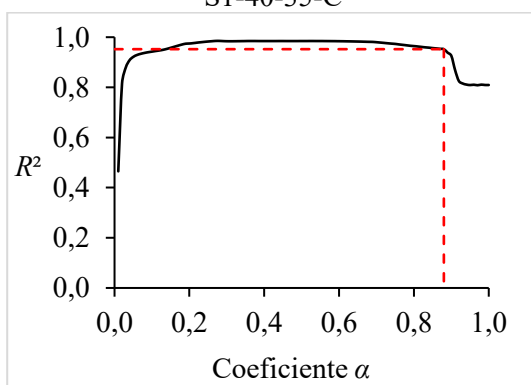
S1-40-35-B



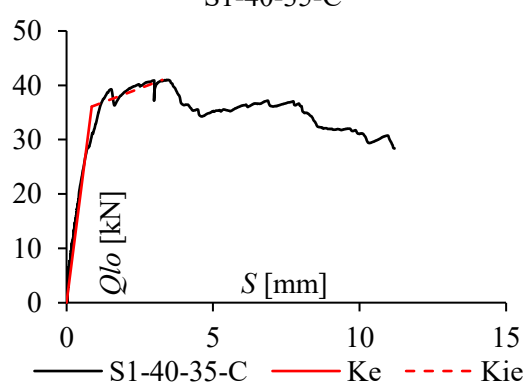
S1-40-35-C



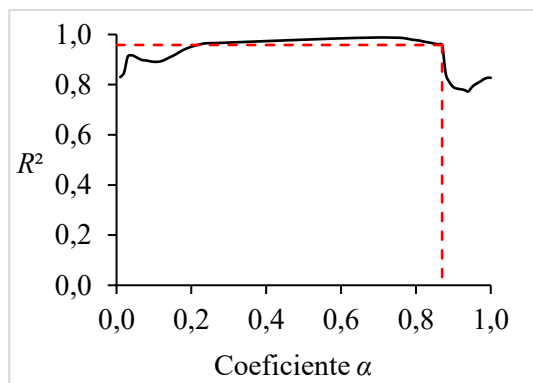
S1-40-35-C



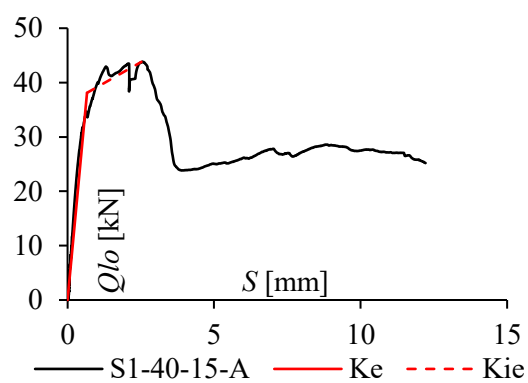
S1-40-25-A



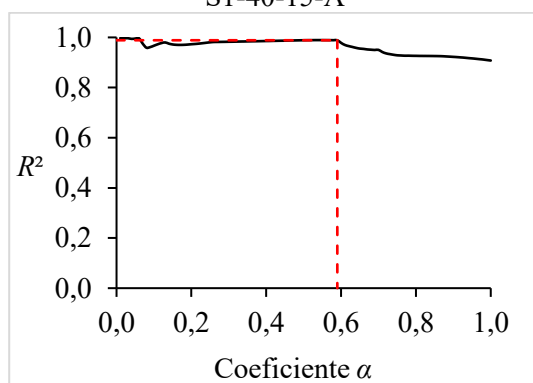
S1-40-25-A



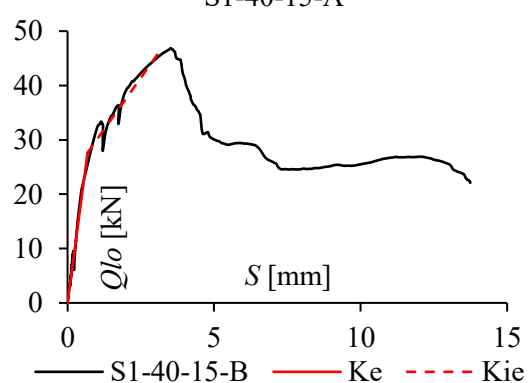
S1-40-15-A



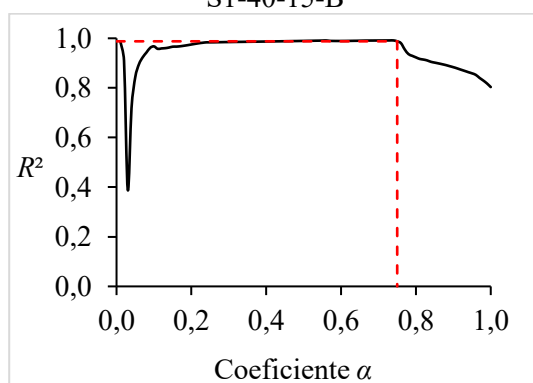
S1-40-15-A



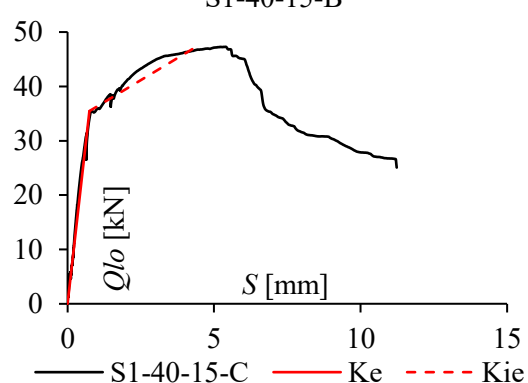
S1-40-15-B



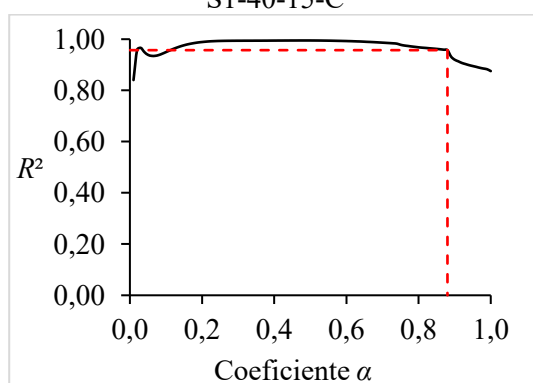
S1-40-15-B



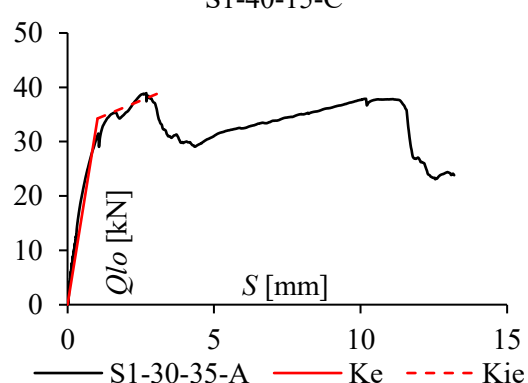
S1-40-15-C



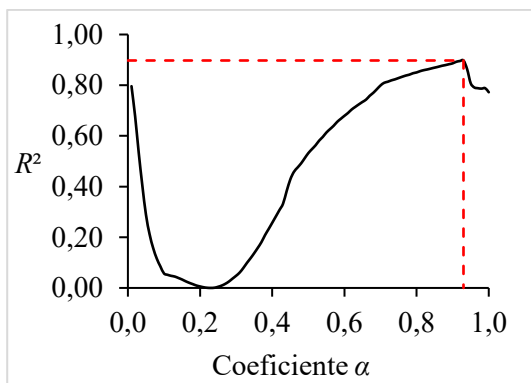
S1-40-15-C



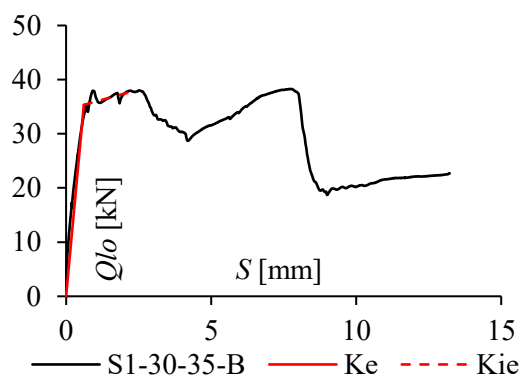
S1-30-35-A



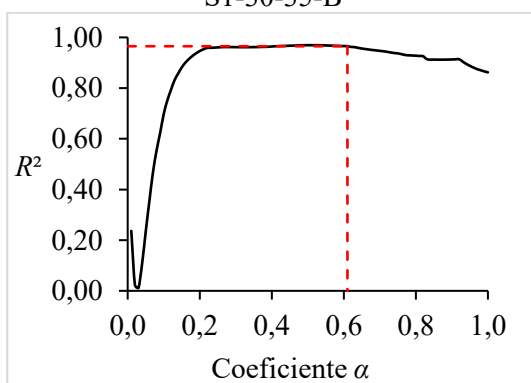
S1-30-35-A



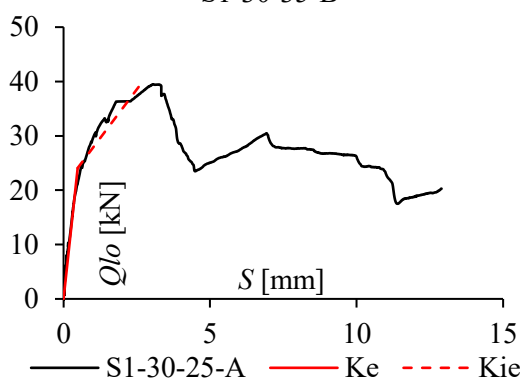
S1-30-35-B



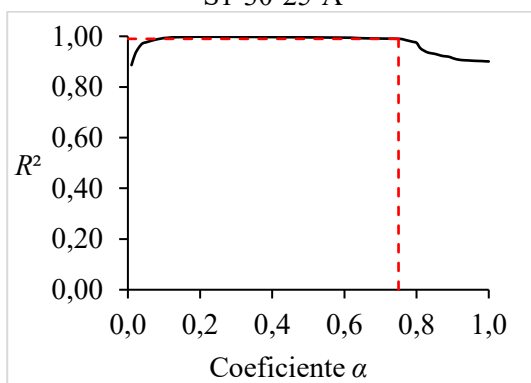
S1-30-35-B



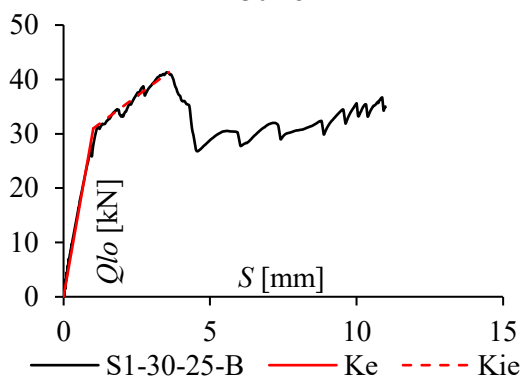
S1-30-25-A



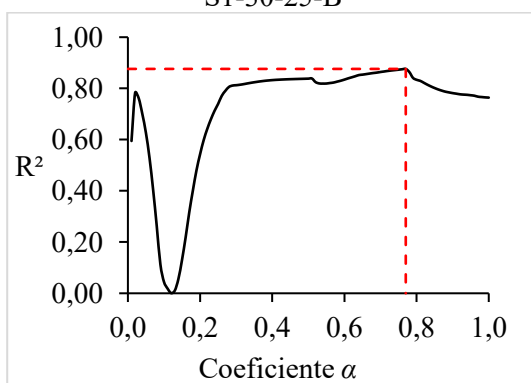
S1-30-25-A



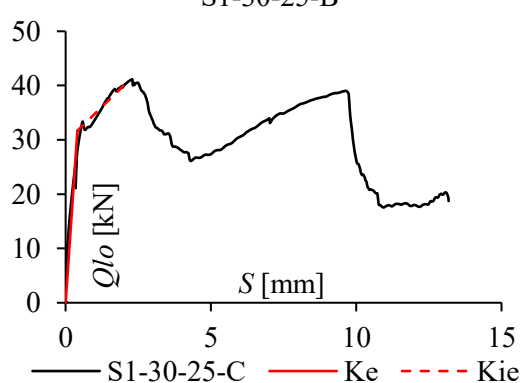
S1-30-25-B



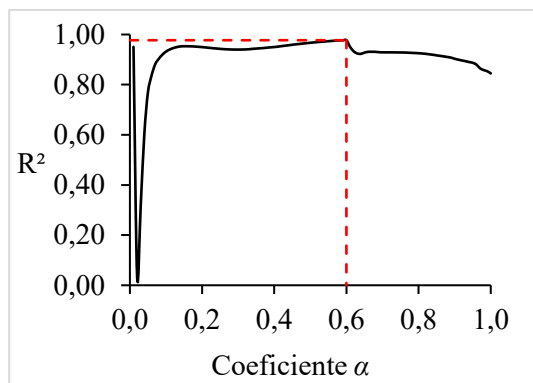
S1-30-25-B



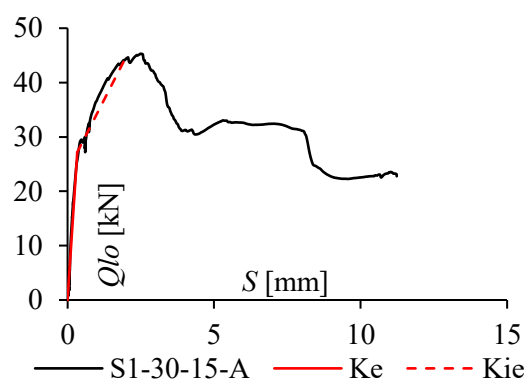
S1-30-25-C



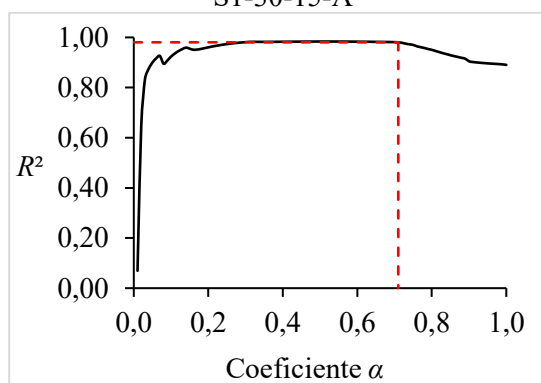
S1-30-25-C



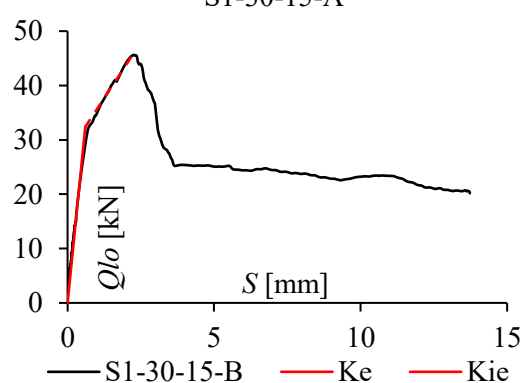
S1-30-15-A



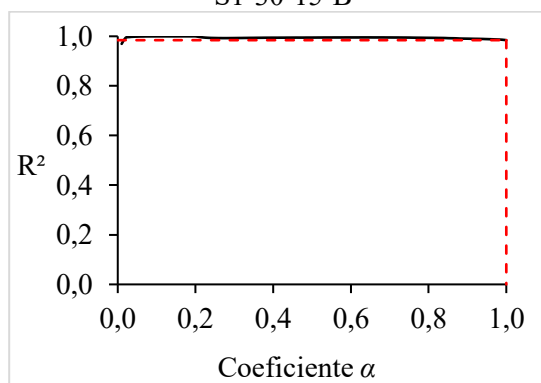
S1-30-15-A



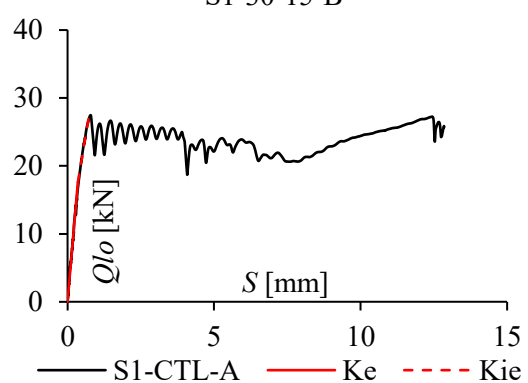
S1-30-15-B



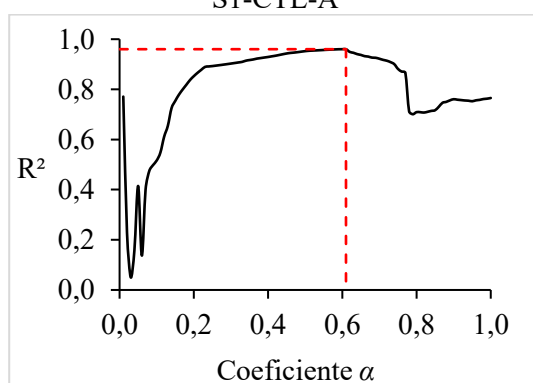
S1-30-15-B



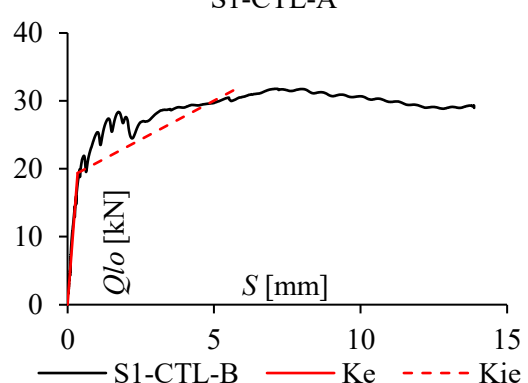
S1-CTL-A



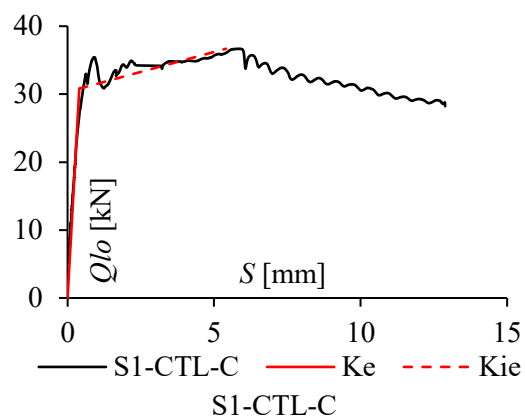
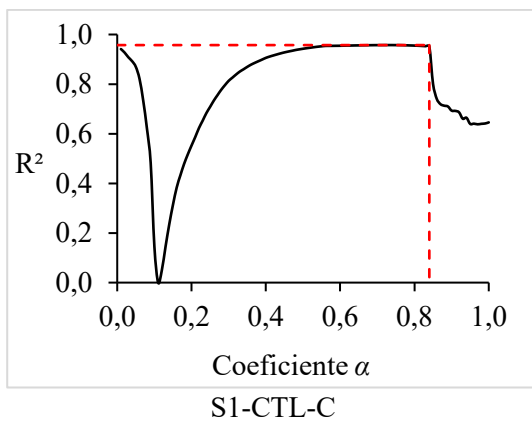
S1-CTL-A



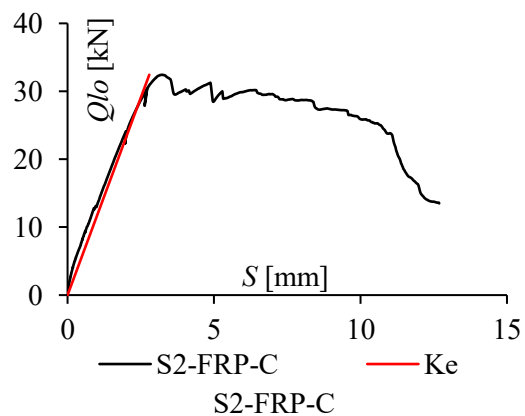
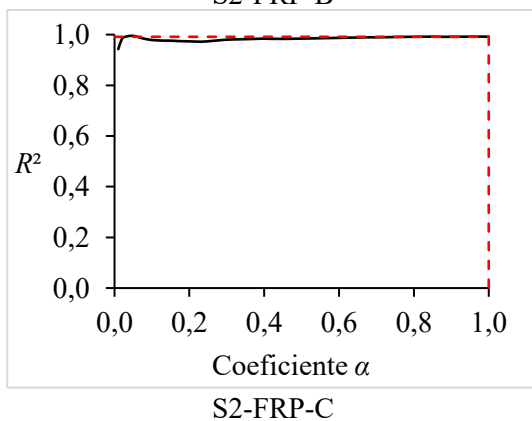
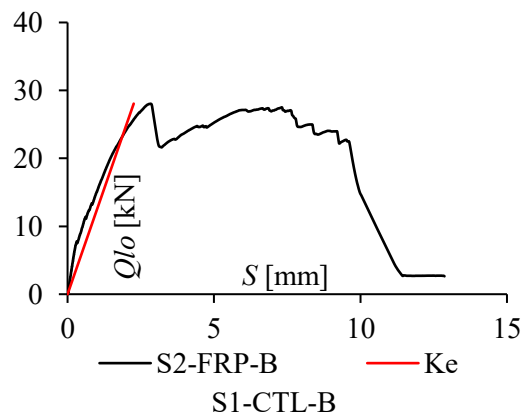
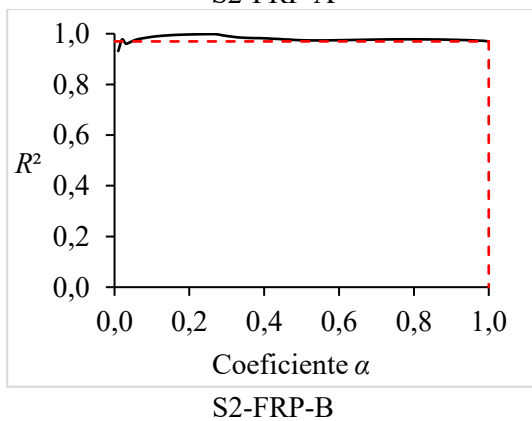
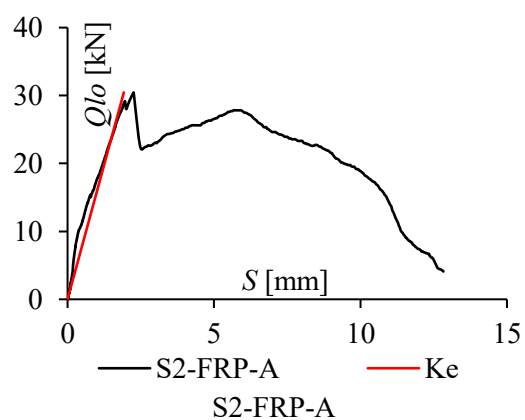
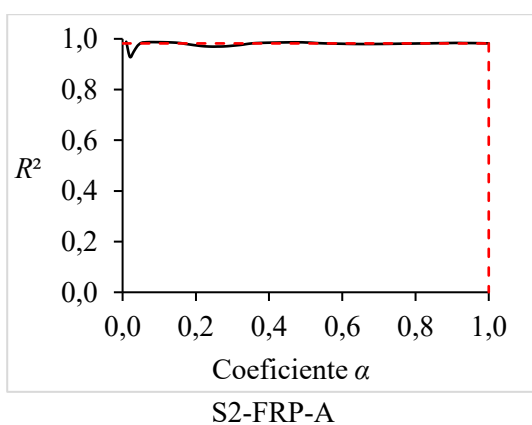
S1-CTL-B

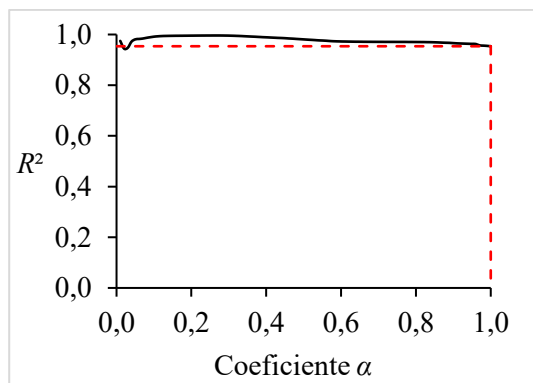


S1-CTL-B

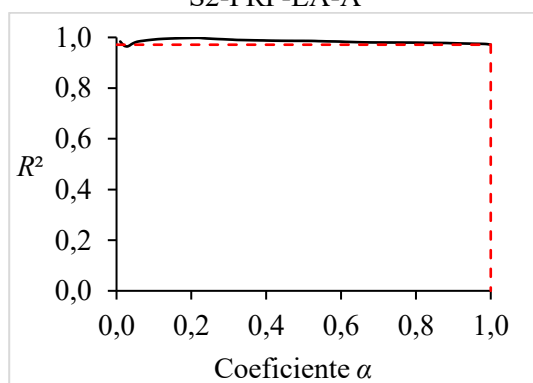


Série 2

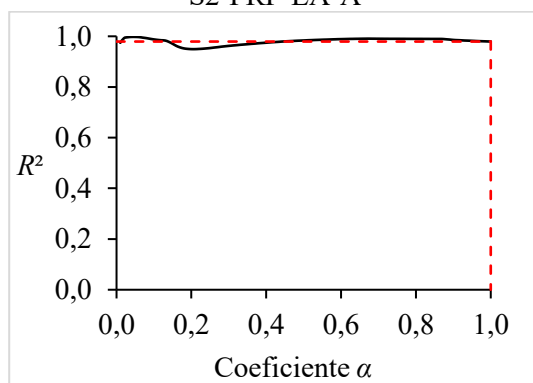




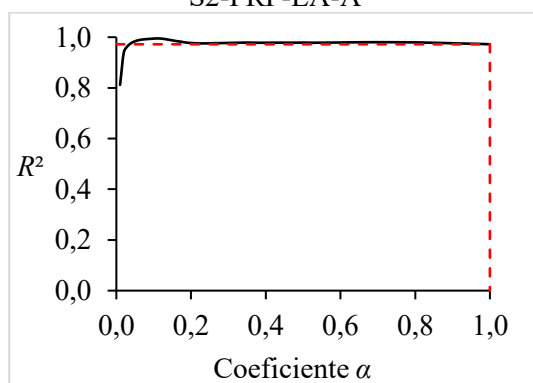
S2-FRP-EA-A



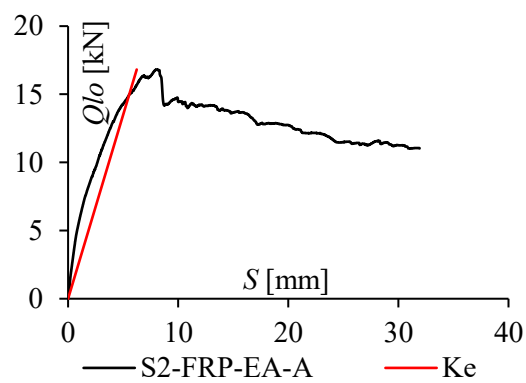
S2-FRP-EA-A



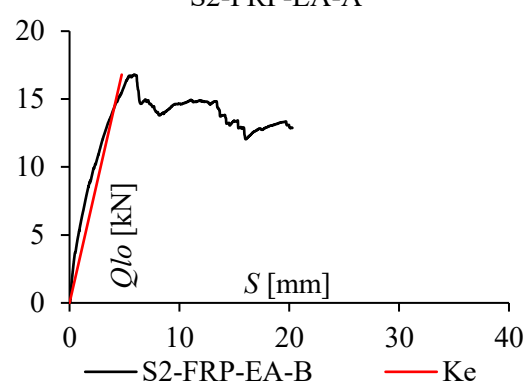
S2-FRP-EA-A



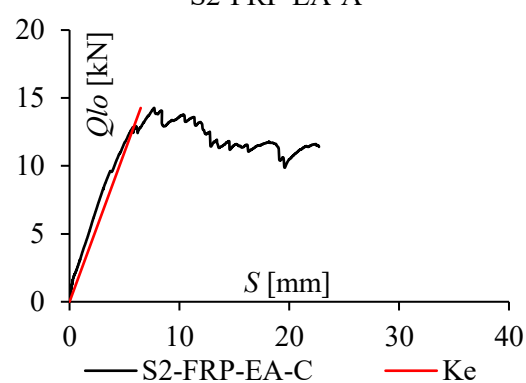
S2-FRP-RH-A



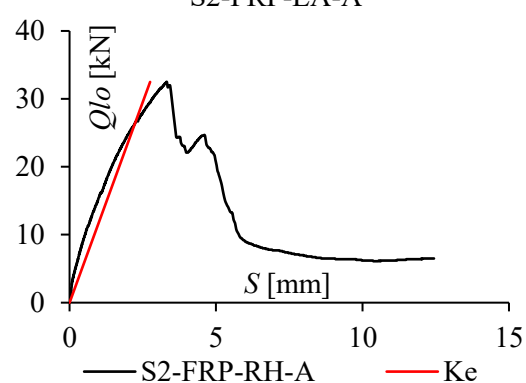
S2-FRP-EA-A



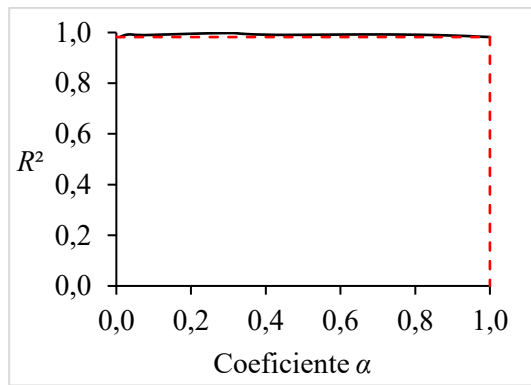
S2-FRP-EA-A



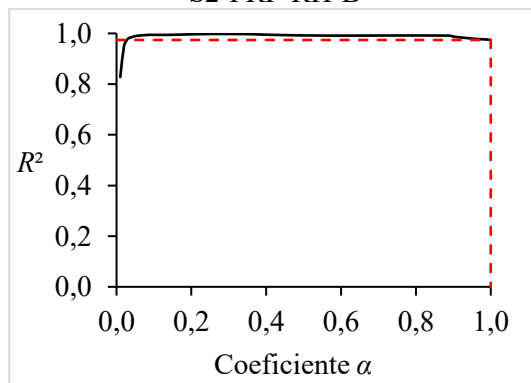
S2-FRP-EA-A



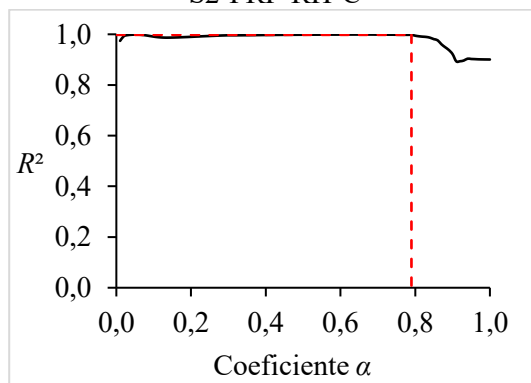
S2-FRP-RH-A



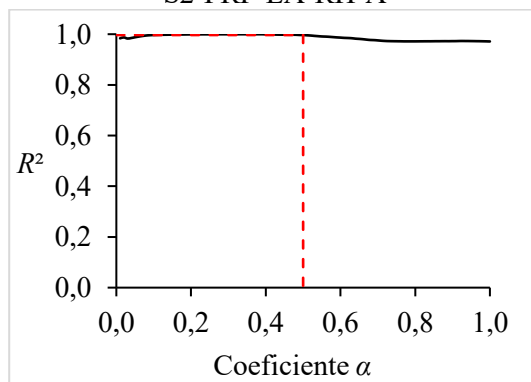
S2-FRP-RH-B



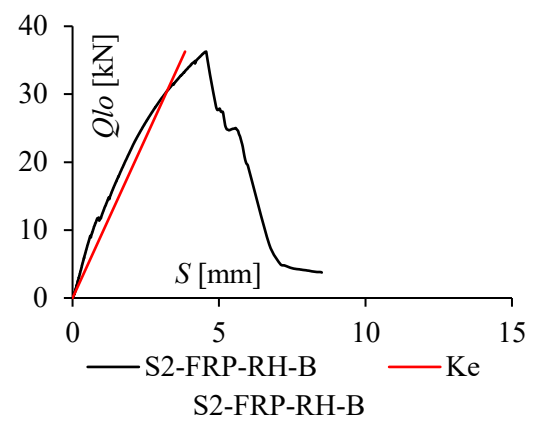
S2-FRP-RH-C



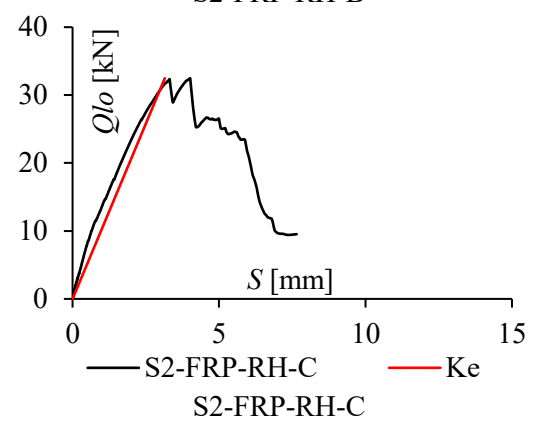
S2-FRP-EA-RH-A



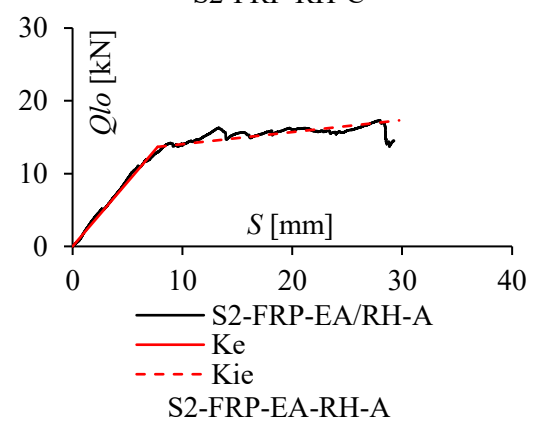
S2-FRP-EA-RH-B



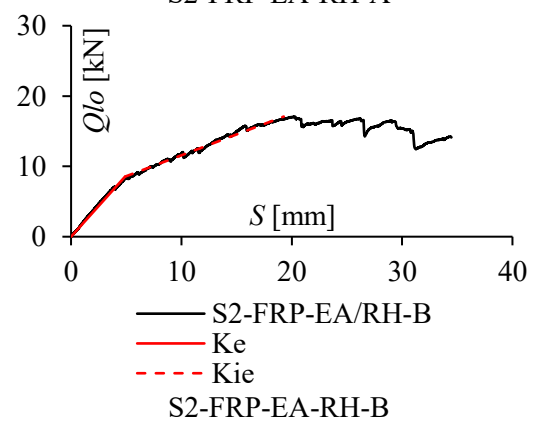
S2-FRP-RH-B



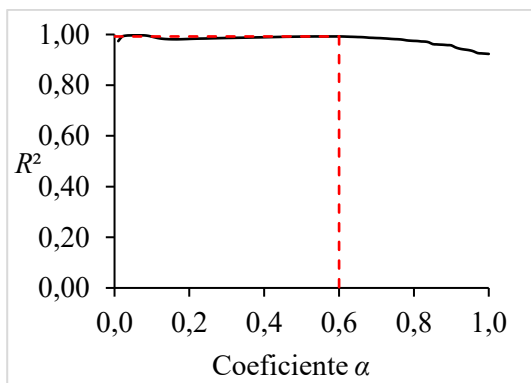
S2-FRP-RH-C



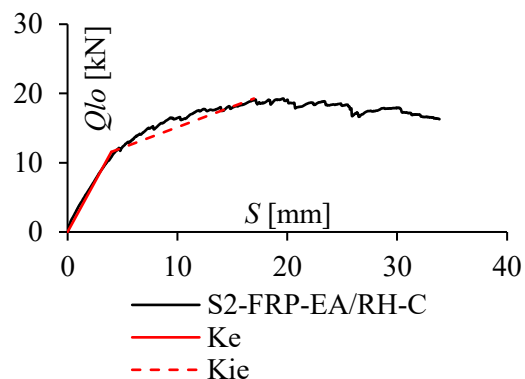
S2-FRP-EA-RH-A



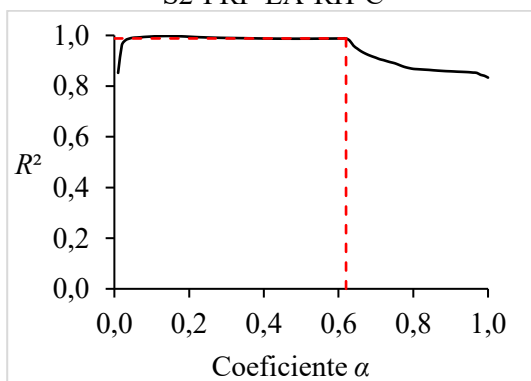
S2-FRP-EA-RH-B



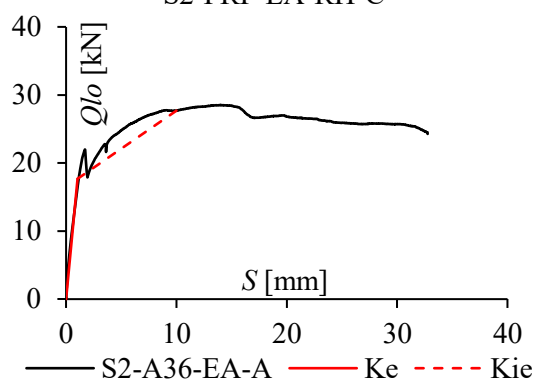
S2-FRP-EA-RH-C



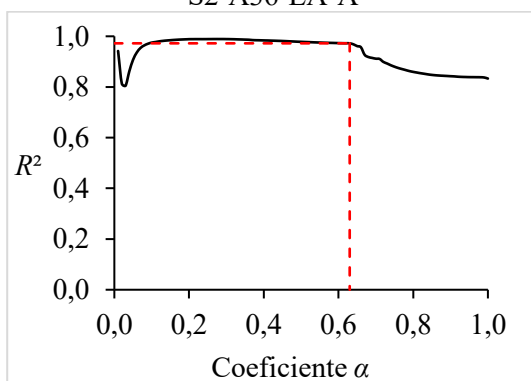
S2-FRP-EA-RH-C



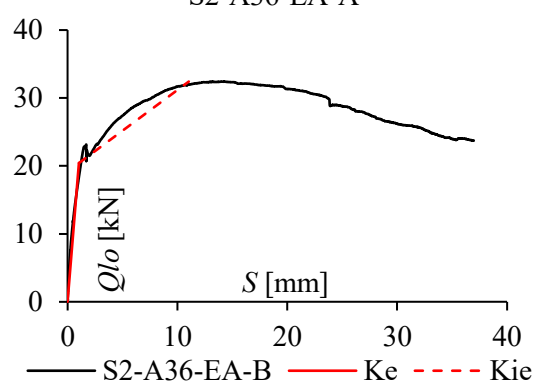
S2-A36-EA-A



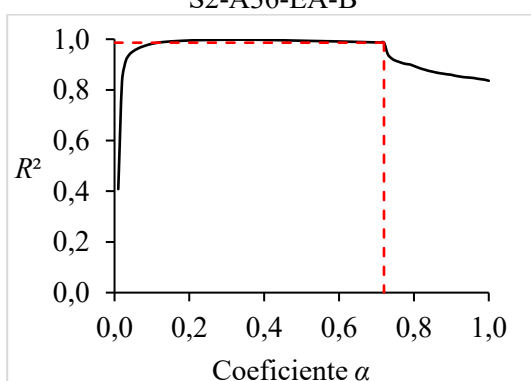
S2-A36-EA-A



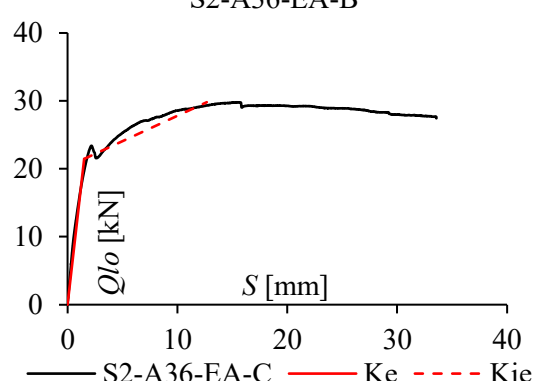
S2-A36-EA-B



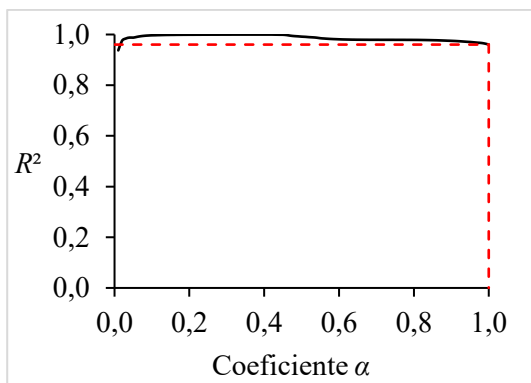
S2-A36-EA-B



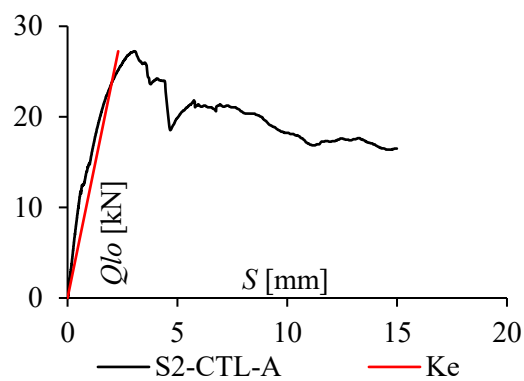
S2-A36-EA-C



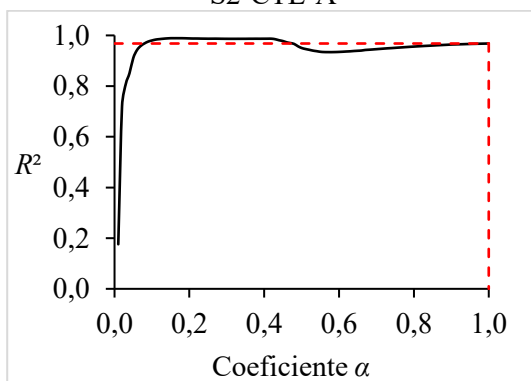
S2-A36-EA-C



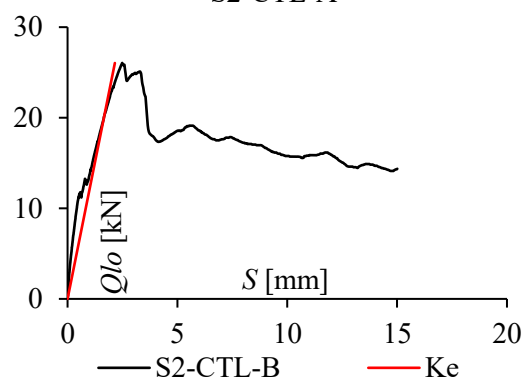
S2-CTL-A



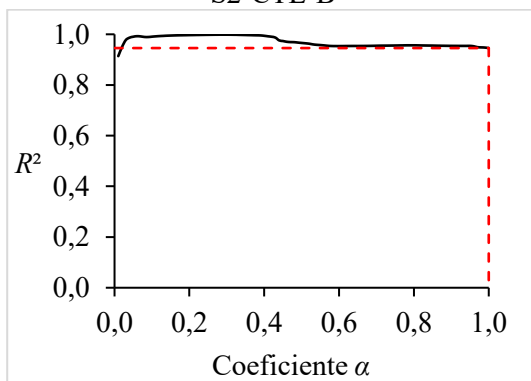
S2-CTL-A



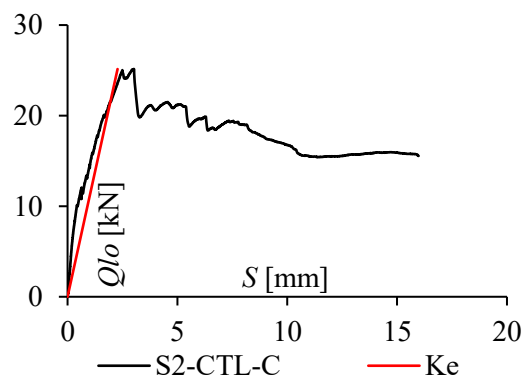
S2-CTL-B



S2-CTL-B

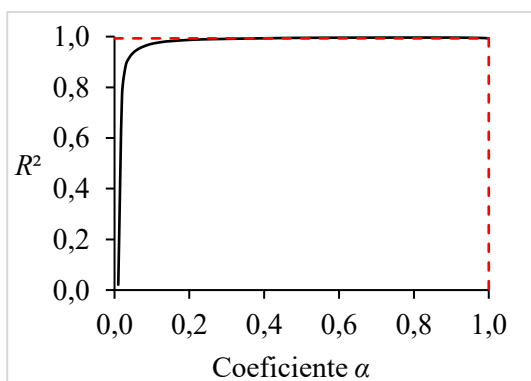


S2-CTL-C

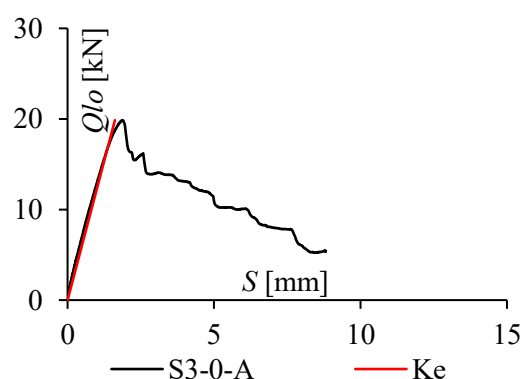


S2-CTL-C

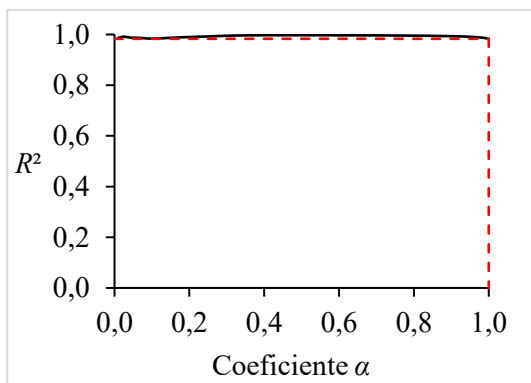
Série 3



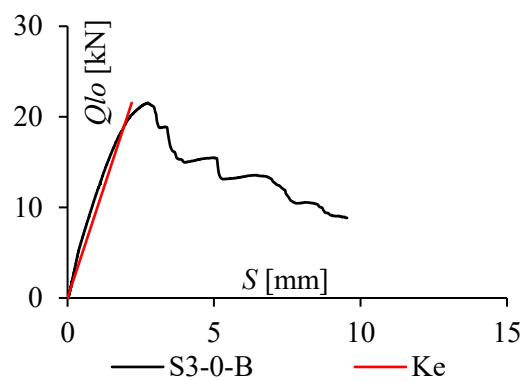
S3-0-A



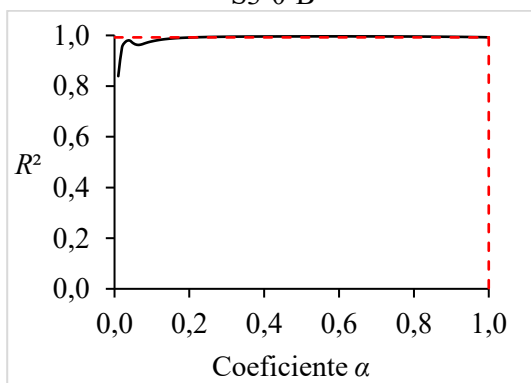
S3-0-A



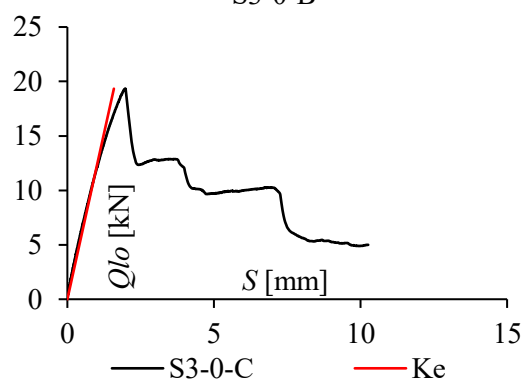
S3-0-B



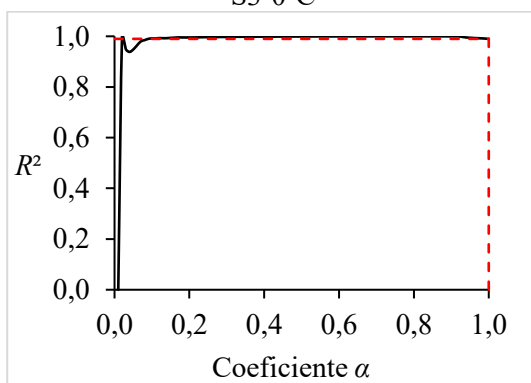
S3-0-B



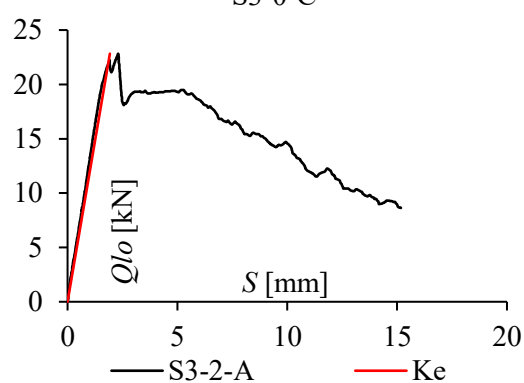
S3-0-C



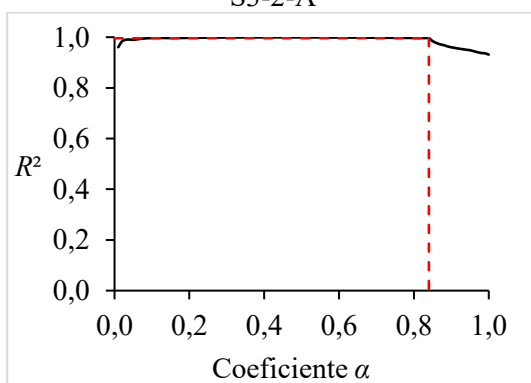
S3-0-C



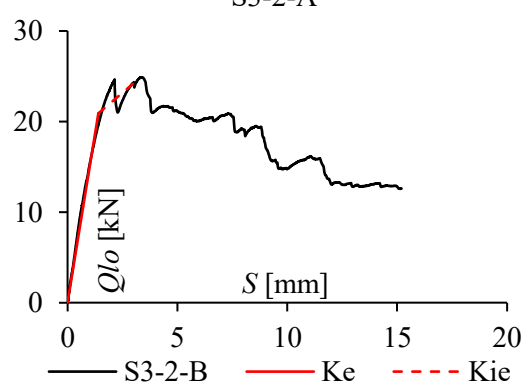
S3-2-A



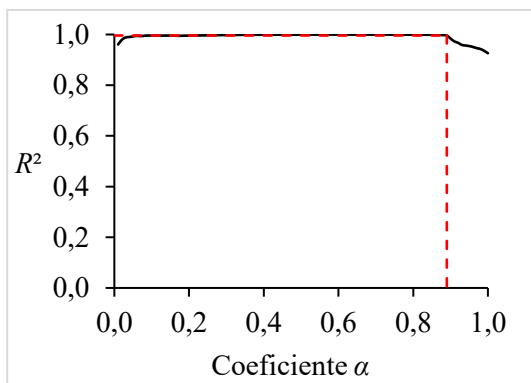
S3-2-A



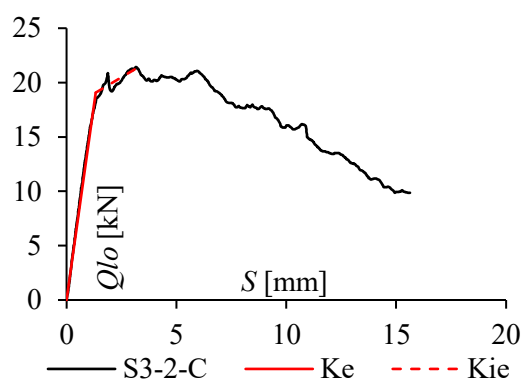
S3-2-B



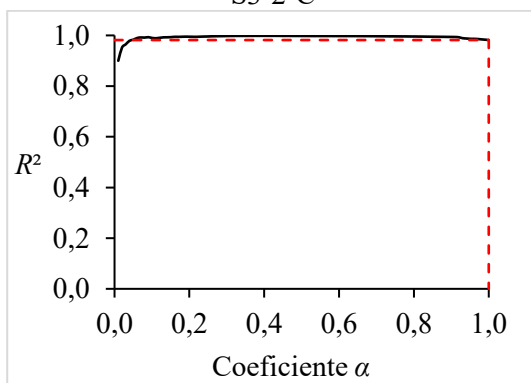
S3-2-B



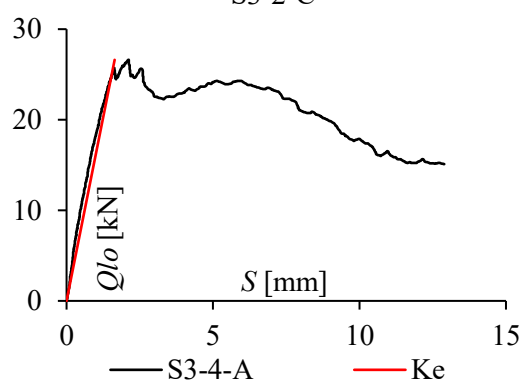
S3-2-C



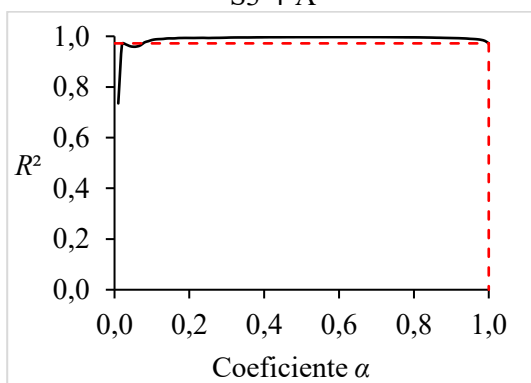
S3-2-C



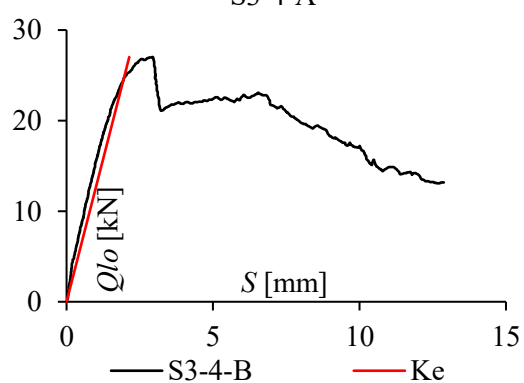
S3-4-A



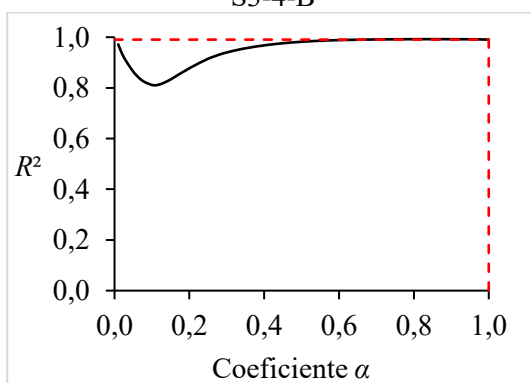
S3-4-A



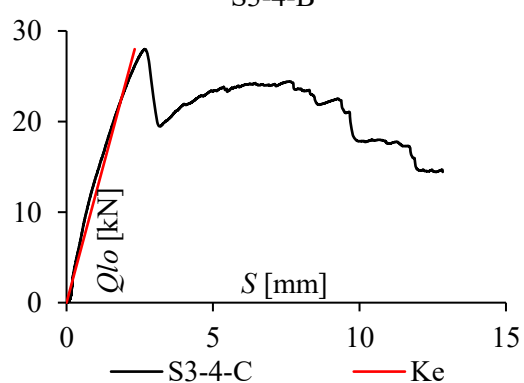
S3-4-B



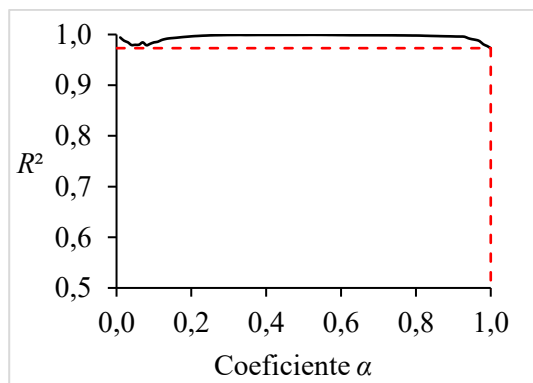
S3-4-B



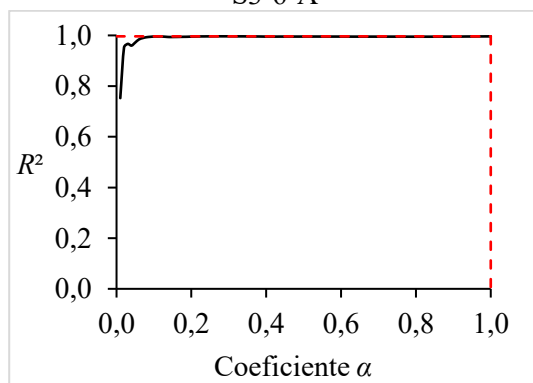
S3-4-C



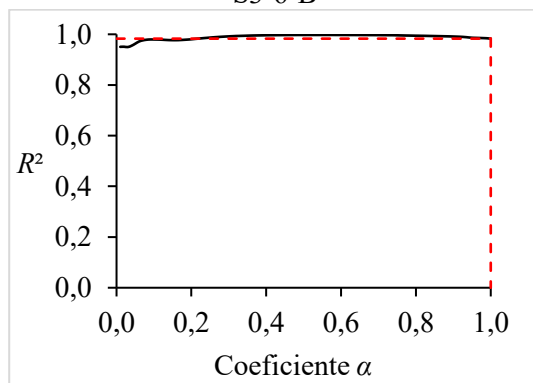
S3-4-C



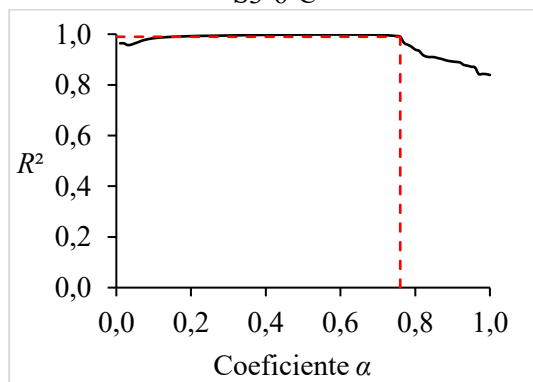
S3-6-A



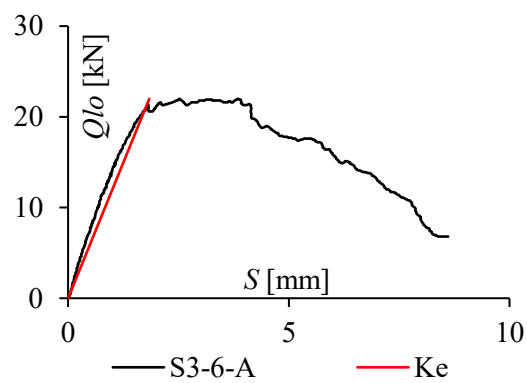
S3-6-B



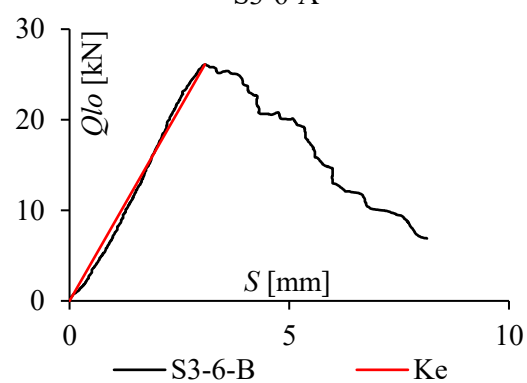
S3-6-C



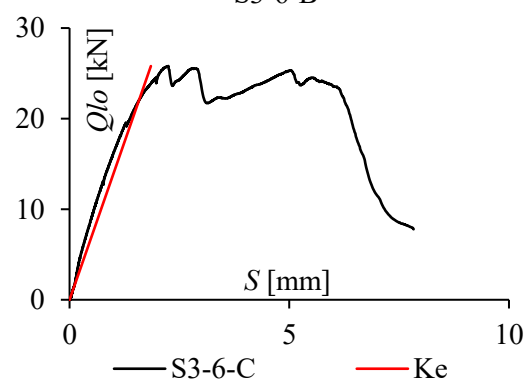
S3-8-A



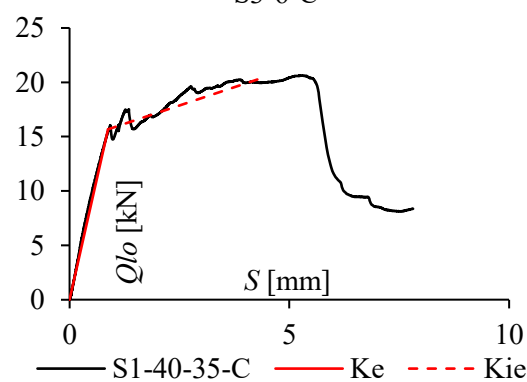
S3-6-A



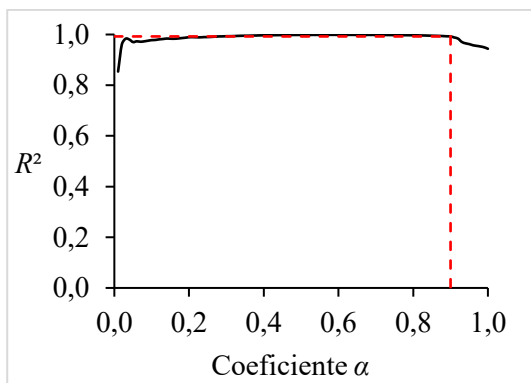
S3-6-B



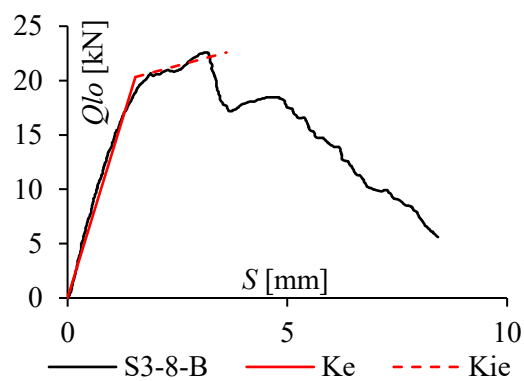
S3-6-C



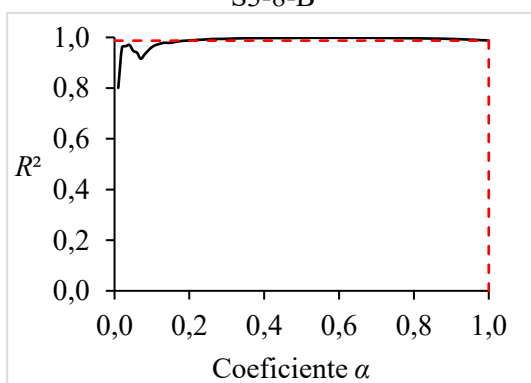
S3-8-A



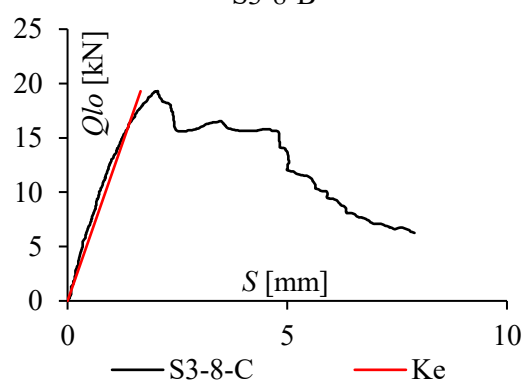
S3-8-B



S3-8-B

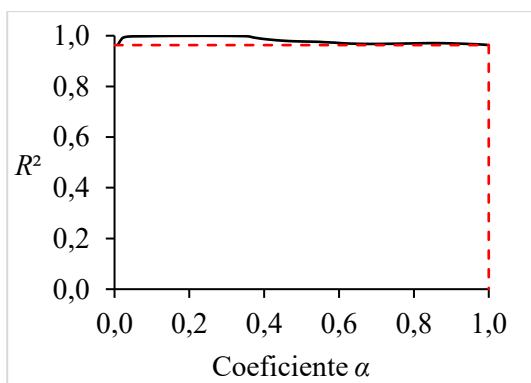


S3-8-C

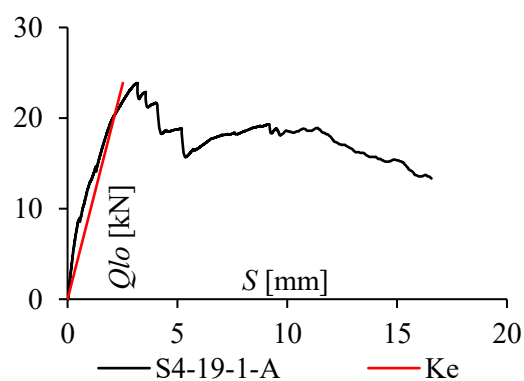


S3-8-C

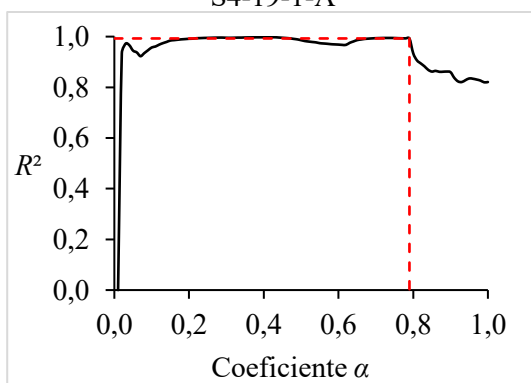
Série 4



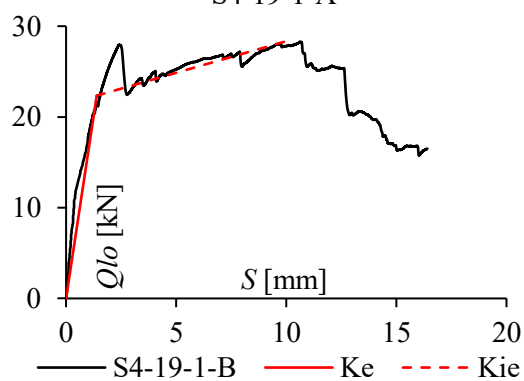
S4-19-1-A



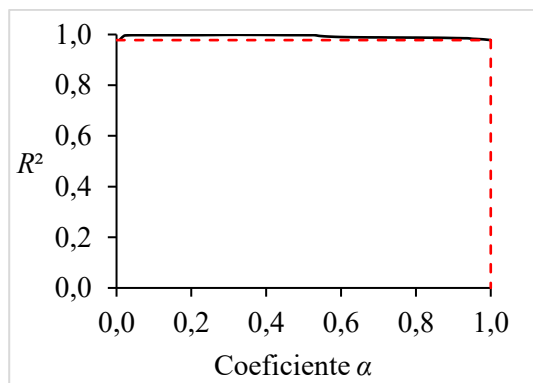
S4-19-1-A



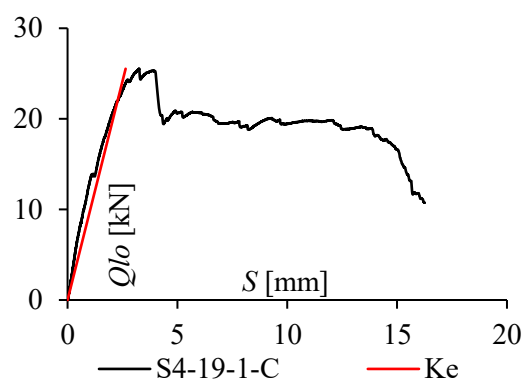
S4-19-1-B



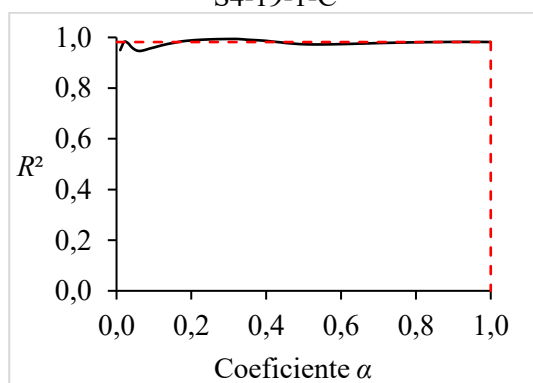
S4-19-1-B



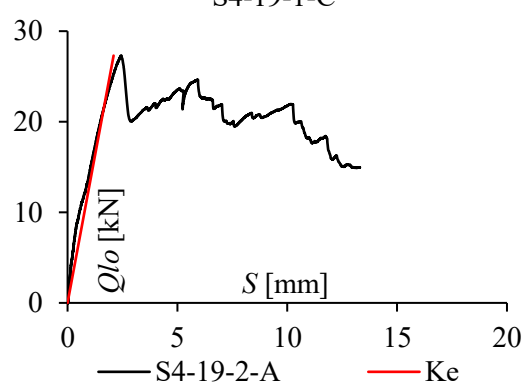
S4-19-1-C



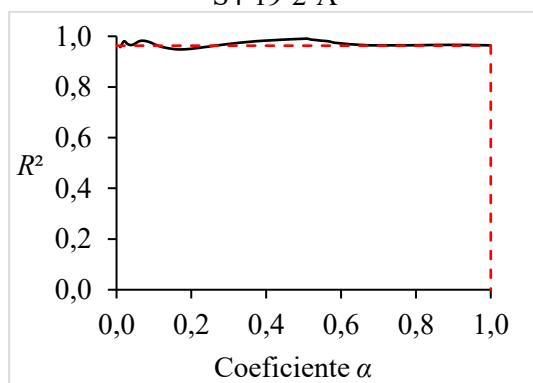
S4-19-1-C



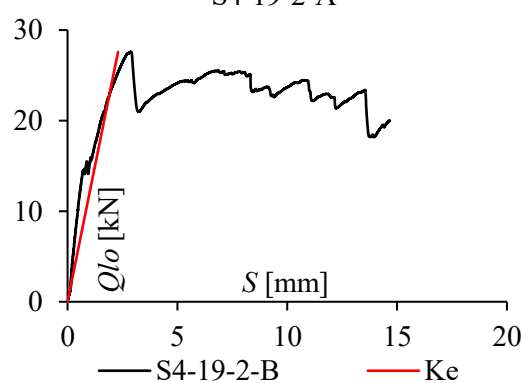
S4-19-2-A



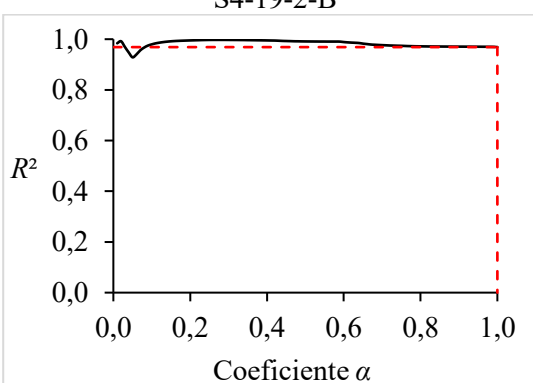
S4-19-2-A



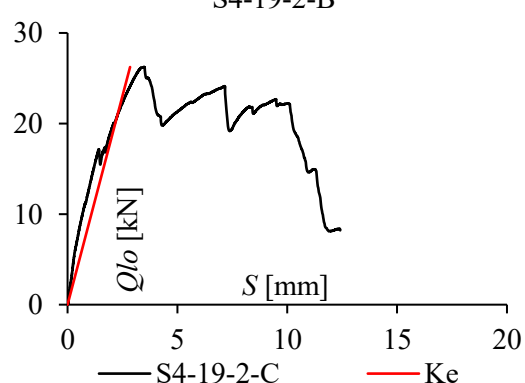
S4-19-2-B



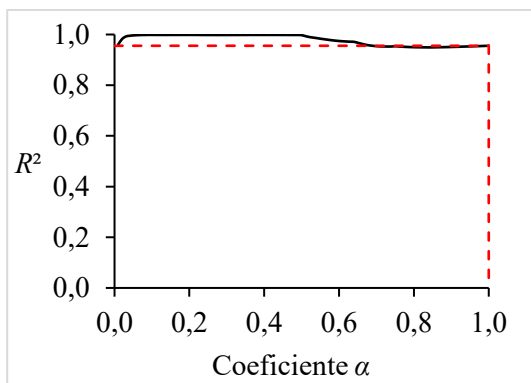
S4-19-2-B



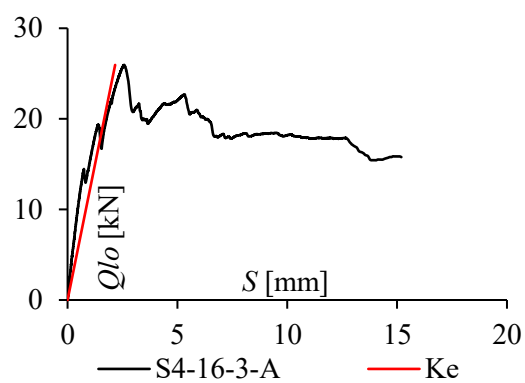
S4-19-2-C



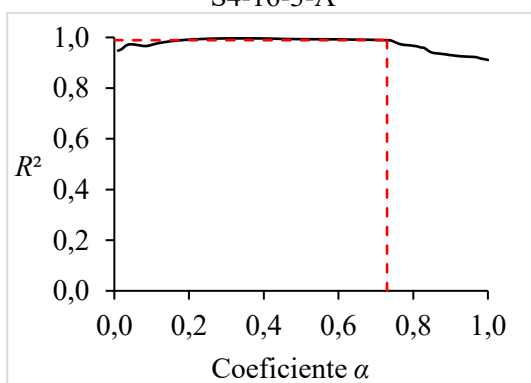
S4-19-2-C



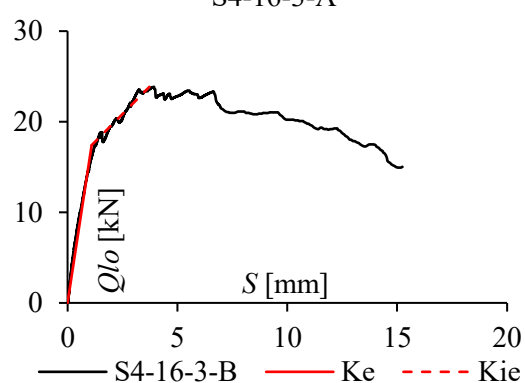
S4-16-3-A



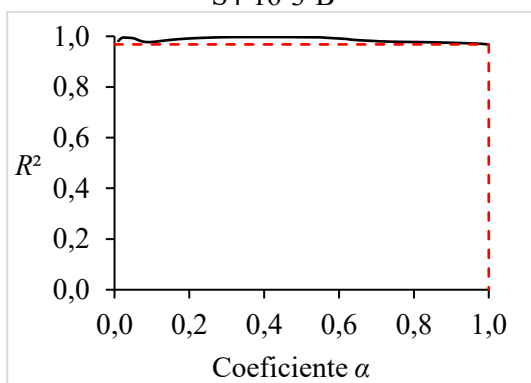
S4-16-3-A



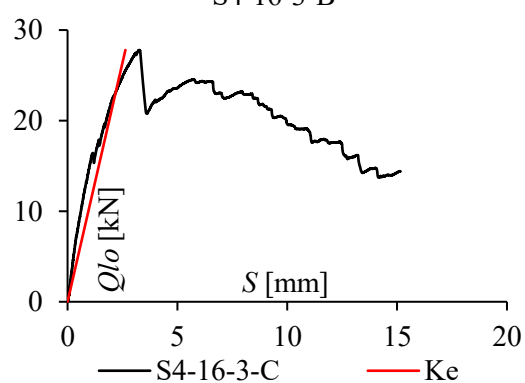
S4-16-3-B



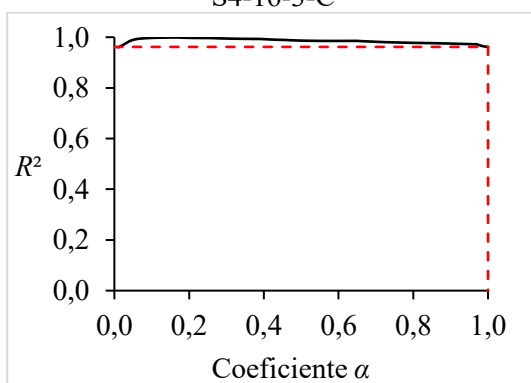
S4-16-3-B



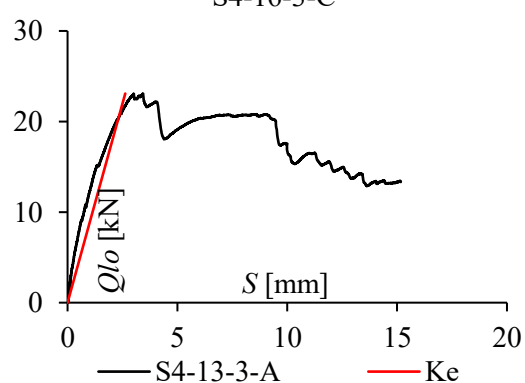
S4-16-3-C



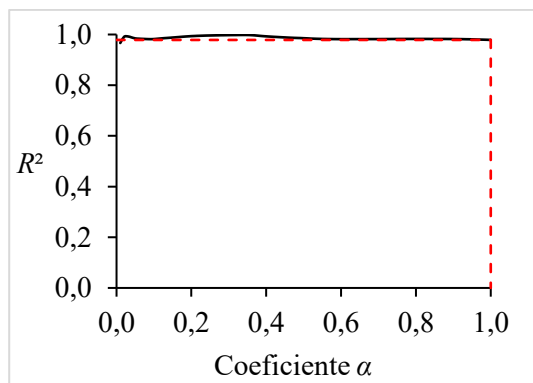
S4-16-3-C



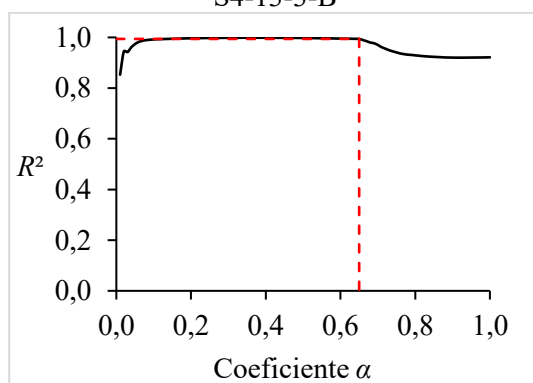
S4-13-3-A



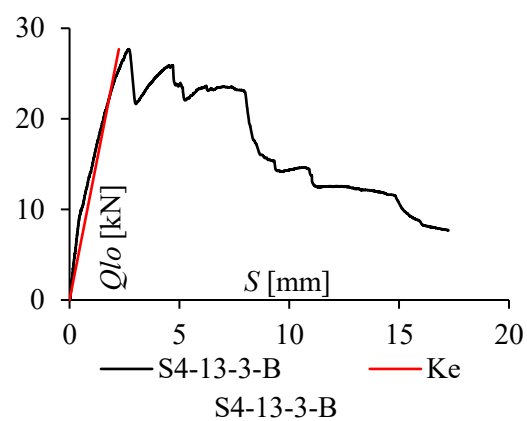
S4-13-3-A



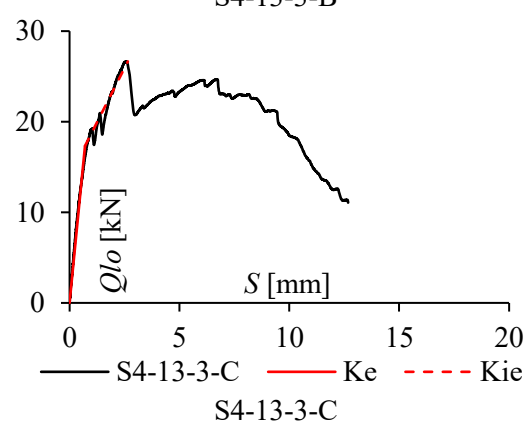
S4-13-3-B



S4-13-3-C



S4-13-3-B



S4-13-3-C