

**COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE CONECTOR FORMADO POR  
REDE DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CURAUÁ**

**GEOVANNA MARIA ANDRADE DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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  
AGOSTO – 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE CONECTOR FORMADO POR  
REDE DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CURAUÁ**

**GEOVANNA MARIA ANDRADE DE OLIVEIRA**

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

BRASÍLIA – DF  
AGOSTO - 2023

**COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE CONECTOR FORMADO POR  
REDE DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CURAUÁ**

**GEOVANNA MARIA ANDRADE DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:

---

Profº. Rodrigo de Melo Lameiras, *D.Sc.* (Universidade de Brasília) (Orientador)

---

Profº. Marcos Honorato de Oliveira, *D.Sc.* (Universidade de Brasília) (Examinador Interno)

---

Profº. Paulo Roberto Lopes Lima, *D.Sc.* (Universidade Estadual de Feira de Santana) (Examinador Externo)

Brasília – DF, 29 de agosto de 2023

Dedico esse trabalho a meu avô

José Gaudêncio de Andrade

## AGRADECIMENTOS

Durante muito tempo dessa jornada eu pensei que por ser opcional não haveria uma seção de agradecimentos. Logo então percebi quão injusta seria se não demonstrasse aqui minha eterna gratidão a todos que me ajudaram a trilhar esse caminho.

Portanto, agradeço a Deus por ter me permitido viver essa experiência e por ser minha força nos momentos de fraqueza e não deixar desistir.

Agradeço ao meu orientador, Rodrigo Lameiras, pelo suporte em todas as etapas da pesquisa, por toda humanidade e compreensão nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais Eliane e Rosivan, minha irmã Jordana e meu companheiro de vida Anderson, razões de todo meu esforço e persistência.

Agradeço aos meus familiares, Maria, Melissa, Arthur, Júnior, Stephanie e Stevan, que me receberam e acolheram em sua casa durante todo meu o tempo que estive em Brasília.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, que muito me ensinaram e tornaram-se amigos. Em especial Layane e Thiago, meus companheiros desde a fase remota das disciplinas, com os quais compartilhei todas as minhas felicidades e tristezas. John e Wallas que pacientemente me ensinaram valiosas lições e contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa. E também aos colegas Késsio, Maurício, Erick, Luís e Matheus pela ajuda durante a realização dos ensaios experimentais.

Agradeço aos técnicos de laboratório Magno, Tenniel e Patrícia pelo auxílio na produção dos materiais e execução dos ensaios.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

## RESUMO

Os painéis sanduíches são paredes pré-moldadas compostas por duas camadas externas de concreto e um núcleo isolante, interligados entre si por conectores de cisalhamento. Os conectores de cisalhamento podem ser fabricados em uma variedade de formatos e, comumente, são confeccionados utilizando o aço. Recentemente, observou-se que o uso do aço na fabricação dos conectores pode resultar em pontes térmicas indesejadas, e, desde então, as pesquisas têm se concentrado no aprimoramento e aplicação dos conectores, visando eliminar o problema das pontes térmicas causadas pelo uso de conectores metálicos. Uma das soluções mais exploradas é o uso dos Polímeros Reforçados com Fibras (FRP), que também envolve a substituição das fibras sintéticas por fibras naturais. As fibras naturais tornaram-se uma alternativa, pois oferecem resistência à tração e módulo de elasticidade suficientemente altos para algumas aplicações de engenharia. Uma das fibras vegetais em destaque na produção de materiais compósitos é a fibra de curauá, uma planta de origem amazônica da espécie das bromélias. Diante disso, o objetivo deste trabalho é propor um conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá e determinar seu comportamento quando submetidos ao cisalhamento através da realização de ensaios *push-out*. Para isso, foi necessário realizar a preparação das fibras de curauá através do tratamento alcalino a base de hidróxido de sódio. Foram empregadas matrizes epóxi, poliéster e uma poliuretana derivada do óleo da mamona, sendo conduzidos testes nessas matrizes e em seus compósitos reforçados com fibra de curauá, visando determinar suas propriedades e também as características da fibra empregada. O método utilizado para produção dos compósitos e também dos conectores do tipo rede foi o sistema de infusão à vácuo. Por fim, foram fabricados os blocos de concreto que representem paredes de painéis sanduíches e são os modelos experimentais para o ensaio *push-out*. Os resultados mostraram que o uso da fibra de curauá como material de reforço gerou maior impacto na matriz de origem vegetal, pois aumentou a resistência à tração de forma que seus compósitos atingiram um desempenho similar aos compósitos de matrizes sintética. Nos ensaios *push-out*, os conectores com compósito de poliéster, epóxi e poliuretana derivada do óleo da mamona alcançaram, respectivamente, forças máximas médias de 9.81kN, 9.93kN e 8.67kN. Os deslocamentos correspondentes à força máxima foi de 12.29mm para o poliéster, 14.18mm para o epóxi e 10.48mm para a poliuretana do óleo da mamona. A aplicação do conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá em painel sanduíche é viável desde que seja empregada uma quantidade maior de conectores para compensar as forças solicitantes do painel.

**Palavras-chave:** polímero reforçado com fibra vegetal; conector de cisalhamento; painel sanduíche, fibra de curauá, poliuretana do óleo da mamona, comportamento mecânico.

## ABSTRACT

Sandwich panels are precast walls composed of two outer layers of concrete and an insulating core, interconnected by shear connectors. Shear connectors can be manufactured in a variety of shapes and are commonly made using steel. Recently, it was observed that the use of steel in the manufacturing of connectors can result in undesirable thermal bridges. Since then, research has focused on improving and applying connectors to eliminate the problem of thermal bridges caused by the use of metallic connectors. One of the most explored solutions is the use of Fiber Reinforced Polymers (FRP), which also involves replacing synthetic fibers with natural fibers. Natural fibers have become an alternative as they offer sufficiently high tensile strength and modulus of elasticity for some engineering applications. One prominent natural fiber in composite material production is curauá fiber, a plant of Amazonian origin belonging to the bromeliad species. Therefore, the objective of this study is to propose a grid connector reinforced with curauá fiber and determine its behavior when subjected to shear through push-out tests. To achieve this, it was necessary to prepare the curauá fibers through an alkaline treatment based on sodium hydroxide. Epoxy, polyester, and a polyurethane derived from castor oil matrices were employed, and tests were conducted on these matrices and their composites reinforced with curauá fiber to determine their properties as well as the characteristics of the fiber used. The method used for producing the composites and the grid connectors was the vacuum infusion system. Finally, concrete blocks representing sandwich panel walls were manufactured as experimental models for the push-out test. The results showed that the use of curauá fiber as a reinforcing material had a greater impact on the plant-based matrix, as it increased the tensile strength to the point where its composites achieved performance similar to those of synthetic matrix composites. In the push-out tests, the connectors with polyester composite, epoxy, and polyurethane derived from castor oil reached average maximum forces of 9.81kN, 9.93kN, and 8.67kN, respectively. The corresponding displacements at maximum force were 12.29mm for polyester, 14.18mm for epoxy, and 10.48mm for castor oil-derived polyurethane. The application of the grid connector reinforced with curauá fiber in sandwich panel is feasible provided that a greater quantity of connectors is used to compensate for the panel's soliciting forces.

**Keywords:** natural fiber reinforced polymer; shear connector; sandwich panel; curauá fiber; castor oil polyurethane; mechanical behavior.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Painel sanduíche de concreto com conector em rede de fibra de vidro (KIM e YOU, 2015).....	17
Figura 2 – Espessura de isolamento necessária para resistir a transmitância térmica de $0.18W \times m^{-2} \times K^{-1}$ usando diferentes materiais (dimensões em mm) (O’HEGARTY e KINNANE, 2020).....	19
Figura 3 – Diferentes formatos de conectores usados em painéis sanduíches (OLSEN, 2017). .....	21
Figura 4 – Modelos de conectores de PRFV (OLSEN, 2017).....	21
Figura 5 – Barra de FRP dobrada: (a) apresentada no painel sanduíche cortado; (b) vista transversal (EINEA <i>et al.</i> , 1994). ....	22
Figura 6 – Vistas do painel sanduíche reforçado com conector de PRFC da <i>AltusGroup</i> : (a) planta; (b) corte vertical (GLEICH, 2007). ....	22
Figura 7 – Conector de cisalhamento de PRFC: (a) amostra do conector no formato em rede; (b) C-GRID numa seção retirada de um painel testado (FRANKL <i>et al.</i> , 2011). ....	23
Figura 8 – Conector polimérico do tipo rede: (a) fibra de carbono utilizada por Sopal (2013) e Nafadi <i>et al.</i> (2021); (b) fibra de vidro utilizada por Kim e You (2015).....	24
Figura 9 – Material e diâmetro dos vergalhões usados como conectores de cisalhamento (TOMLINSON <i>et al.</i> , 2016). ....	24
Figura 10 – Distribuição de carga no painel sanduíche: (a) não compósito; (b) compósito. Adaptado de Lameiras (2015). ....	26
Figura 11 – Dimensões e eixo neutro para painéis sanduíche compósito e não compósito. ....	27
Figura 12 – Corpo de prova para ensaio <i>push-out</i> conforme EN 1994-1-1 (2004) (dimensões em mm): (a) vista frontal; (b) vista superior.....	28
Figura 13 – Ensaio <i>push-out</i> (dimensões em mm): (a) configuração do ensaio; (b) conector PerfoFRP; (c) vista em planta do corpo de prova; (d) Corte AA do corpo de prova. Adaptado de Lameiras, 2015.....	29
Figura 14 – Configuração do ensaio <i>push-out</i> (NAITO <i>et al.</i> , 2012).....	31
Figura 15 – Dimensões dos conectores de cisalhamento ( $1in = 25.4mm$ ) (NAITO <i>et al.</i> , 2012). .....	31
Figura 16 – Ensaio <i>push-out</i> : (a) configuração do ensaio; (b) conector GFRP; (c) dimensões do corpo de prova; (d) modo de ruptura do conector ensaio. Adaptado de Huang e Dai (2019)..	34
Figura 17 – Geometria do corpo de prova de concreto analisada por Silva (2020) (dimensões em mm).....	35



Figura 18 – Curva carregamento × deslocamento do bloco SP-EPS (SILVA, 2020).....	36
Figura 19 – Características da planta de mamona: (a) fruto verde com espinhos; (b) fruto vermelho com espinhos; (c) fruto verde sem espinhos; (d) sementes. (MILANI, 2022). .....	43
Figura 20 – Fibras sintéticas de: (a) vidro, (b) carbono, (c) basalto e (d) aramida. ....	47
Figura 21 – Classificação das fibras naturais. Adaptado de Sanjay <i>et al.</i> (2018). ....	49
Figura 22 – Aparência do curauá: (a) folhas verdes; (b) folhas roxo-avermelhadas (SILVA, 2011). .....	51
Figura 23 – Processo de produção da fibra de curauá (SILVA, 2011). .....	52
Figura 24 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa. ....	58
Figura 25 - Fibra de curauá: (a) <i>in natura</i> ; (b) processo de tratamento; (c) fibra penteada. ....	60
Figura 26 - Manta de curauá. ....	61
Figura 27 – Resinas: (a) processo de moldagem; (b) corpos de prova para ensaio de tração. .	62
Figura 28 – Esquema de montagem do sistema de infusão à vácuo. ....	63
Figura 29 – Placa compósita com matriz poliuretana do óleo da mamona. ....	64
Figura 30 – Corpos de prova dos compósitos para ensaio de tração. ....	65
Figura 31 – Realização dos ensaios de tração: (a) matriz polimérica; (b) material compósito. ....	65
Figura 32 – Simulação do ensaio <i>push-out</i> no programa computacional Ftool: (a) modelo de atuação de carga; (b) diagrama de força axial (kN). .....	67
Figura 33 – Conectores do tipo rede propostos: (a) vista frontal; (b) vista isométrica. Todas as unidades em centímetros (cm). .....	68
Figura 34 – Fabricação do conector de cisalhamento do tipo rede com fibra de curauá. ....	69
Figura 35 – Vista frontal do bloco de concreto (todas as unidades em cm). .....	70
Figura 36 – Vista superior do bloco de concreto (todas as unidades em cm). ....	71
Figura 37 – Processo de fabricação dos corpos de prova de concreto. ....	72
Figura 38 – Configuração experimental utilizada para realização do ensaio <i>push-out</i> . ....	73
Figura 39 – Microscopia da fibra de curauá: (a) fibra <i>in natura</i> 400×; (b) fibra tratada 400×; (c) fibra <i>in natura</i> 1000×; (d) fibra tratada 1000×. ....	76
Figura 40 – Curva tensão × deformação da matriz: (a) poliéster; (b) epóxi; (c) óleo de mamona. ....	77
Figura 41 – Curva tensão × deformação dos compósitos: (a) CCPO-070; (b) CCEP-070; (c) CCOM-070. ....	80
Figura 42 – Curva tensão × deformação dos compósitos: (a) CCPO-175; (b) CCEP-175; (c) CCOM-175. ....	81

Figura 43 – Curva tensão × deslocamento dos compósitos: (a) CCPO-175; (b) CCEP-175; (c) CCOM-175. ....	83
Figura 44 – Representação da atuação da carga nos conectores. ....	87
Figura 45 – Conectores de matriz poliéster extraídos dos blocos de concreto após ensaio <i>push-out</i> : ....	88
Figura 46 – Conectores de matriz epóxi extraídos dos blocos de concreto após ensaio <i>push-out</i> : ....	89
Figura 47 – Conectores de matriz poliuretana do óleo da mamona extraídos dos blocos de concreto após ensaio <i>push-out</i> : (a) CONC-CCOM 01; (b) CONC-CCOM 02; (c) CONC-CCOM 03. ....	90
Figura 48 – Fissuras no concreto na mesma direção dos conectores. ....	91
Figure 49 – Espécime do painel sanduíche após ensaio <i>push-out</i> . ....	92
Figura 50 – Curvas força × deslocamento: (a) CONC-CCPO; (b) CONC-CCEP; (a) CONC-CCOM. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Lameiras (2015). .....	30
Tabela 2 – Resultados dos ensaios <i>push-out</i> conduzidos por Naito <i>et al.</i> (2012). .....	32
Tabela 3 – Resultados dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Huang e Dai (2019). .....	34
Tabela 4 – Resultados dos testes <i>push-out</i> realizados por Silva (2020). .....	36
Tabela 5 – Propriedades de polímeros utilizados na produção de compósitos (MALLICK, 2017). .....	39
Tabela 6 – Propriedades de tensão de compósitos de base epóxi e poliéster. ....	40
Tabela 7 – Composição do óleo da mamona (OGUNNIYI, 2006). .....	44
Tabela 8 – Resumo das propriedades dos compósitos estudados por Sousa (2013). .....	45
Tabela 9 - Propriedades das fibras sintéticas. Adaptado de Gangil <i>et al.</i> (2020). .....	49
Tabela 10 - Propriedades das fibras naturais. Adaptado de Gangil <i>et al.</i> (2020). .....	50
Tabela 11 – Composição da fibra de curauá (NETA <i>et al.</i> , 2015). .....	53
Tabela 12 – Identificação dos espécimes analisados. ....	59
Tabela 13 – Propriedades mecânicas de tração das resinas. ....	78
Tabela 14 – Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de curauá. ....	83
Tabela 15 – Propriedades estimadas para fibra de curauá. ....	85
Tabela 16 – Rigidez dos conectores de cisalhamento. ....	95

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
2.1. PAREDES DE PAINEL SANDUÍCHE .....	17
<b>2.1.1. Principais constituintes</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.2. Comportamento estrutural</b> .....	<b>25</b>
2.2. COMPORTAMENTO DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO .....	27
2.3. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS .....	37
<b>2.3.1. Matrizes poliméricas</b> .....	<b>38</b>
<b>2.3.2. Reforço com fibra sintética</b> .....	<b>46</b>
<b>2.3.3. Reforço com fibra natural</b> .....	<b>49</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>58</b>
3.1. ESTUDOS NA ESCALA DO COMPÓSITO .....	59
<b>3.1.1. Tratamento das fibras de curauá</b> .....	<b>59</b>
<b>3.1.2. Moldagem dos corpos de prova de resina</b> .....	<b>61</b>
<b>3.1.3. Produção dos compósitos através da infusão à vácuo</b> .....	<b>62</b>
<b>3.1.4. Ensaio de tração</b> .....	<b>65</b>
3.2. PRODUÇÃO DOS CONECTORES .....	66
<b>3.2.1. Proposta dos conectores de cisalhamento do tipo rede</b> .....	<b>66</b>
<b>3.2.2. Produção dos conectores do tipo rede por infusão à vácuo</b> .....	<b>68</b>
3.3. MODELO EXPERIMENTAL DO ENSAIO <i>PUSH-OUT</i> .....	70
<b>3.3.1. Descrição dos espécimes para ensaio <i>push-out</i></b> .....	<b>70</b>
<b>3.3.2. Produção dos blocos de concreto</b> .....	<b>71</b>
<b>3.3.3. Ensaio <i>push-out</i></b> .....	<b>72</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>75</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	75

4.1.1.	Microscopia eletrônica de varredura.....	75
4.1.2.	Propriedades mecânica das matrizes.....	76
4.1.3.	Propriedades mecânica dos compósitos.....	79
4.1.4.	Propriedades estimadas para fibra de curauá.....	84
4.2.	ENSAIOS <i>PUSH-OUT</i> .....	86
4.2.1.	Padrões de fissuração.....	86
4.2.2.	Carregamento × deslocamento relativo.....	93
4.2.3.	Rigidez dos conectores.....	94
5.	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101

## 1. INTRODUÇÃO

Os painéis sanduíches são tipicamente constituídos por duas camadas de concreto separadas por isolamento de espuma rígida, normalmente de poliestireno expandido (EPS) ou de poliestireno extrudido (XPS), pois esses materiais apresentam alto desempenho térmico e oferece facilidade de trabalho (KIM; YOU, 2015).

Dependendo da aplicação final do painel, existem vários materiais que podem ser utilizados como camadas externas, núcleo ou para ligação dessas camadas. Sendo que, o material mais empregado como camada externa é o concreto, podendo ser armado ou protendido (AZEVEDO, 2013).

Os materiais utilizados como núcleo são homogêneos, sendo os mais comuns as espumas, lãs ou diferentes tipos de poliestireno. A principal exigência para essa camada é que ela possua baixa capacidade de absorção de água, afim de evitar que a água do concreto das camadas externas seja absorvida durante a montagem do painel (AZEVEDO, 2013).

Já os conectores auxiliam no correto funcionamento do sistema e podem ser fabricados em vários materiais e com diferentes geometrias, como: formatos “C”, “Z” e “M”, buchas de metal, ganchos, grelhas metálicas, pregos ou pinos de plástico e malhas de fibra de carbono (AZEVEDO, 2013). Porém, Lameiras *et al.* (2012) apontam que o uso de conectores metálicos, principalmente em painéis de fachadas, cria pontes térmicas que podem resultar em um maior consumo energético para o edifício e problemas relacionados a umidade.

Nos últimos anos, um conjunto de estudos (EINEA *et al.*, 1994; SALMON *et al.*, 1997; HASSAN; RIZKALLA, 2010; NAITO *et al.*, 2012; TOMLINSON *et al.*, 2016) tem explorado a viabilidade do uso de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) como alternativa aos conectores metálicos em painéis sanduíche. A principal motivação por trás dessa abordagem é a redução das pontes térmicas intrínsecas aos conectores metálicos, visando aprimorar significativamente a eficiência energética das construções. Entretanto, é fundamental reconhecer que o FRP, embora apresente vantagens, acarreta questões ambientais substanciais.

O FRP, um composto plástico, tem se mostrado um material questionável devido ao seu impacto ambiental significativo. A maior parte das resinas utilizadas é derivada de recursos não renováveis, em geral do petróleo. Além disso, a etapa de produção das fibras requer quantidades consideráveis de energia.

As pesquisas mais recentes na área da tecnologia dos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras estão buscando viabilizar o uso de materiais renováveis, biodegradáveis, de baixo custo e impacto ambiental reduzido (NAIR, JOSEPH, 2014; SANJAY *et al.*, 2018; RAHMAN, PUTRA, 2019). Para ser totalmente sustentável, a nova geração de compósitos

precisa ser baseada em materiais inteiramente renováveis. Por isso, os biopolímeros que são genuinamente biodegradáveis e possuem propriedades que se igualam ou superam os termoplásticos estão sob intensa investigação para aplicação em biocompósitos (MOHANTY *et al.*, 2005).

As fibras naturais, por sua vez, passaram a ser consideradas uma alternativa viável para substituir as fibras sintéticas, pois, apesar de apresentarem propriedades mecânicas, como resistência à tração e módulo de elasticidade, mais baixos que os das fibras sintéticas, os valores são suficientemente altos para algumas aplicações de engenharia (SALGADO; SILVA, 2021).

Uma das fibras sugeridas para produção de compósitos poliméricos de menor impacto ambiental é a fibra de curauá, uma planta de origem amazônica da espécie das bromélias e cientificamente conhecida como *Ananás erectifolius*. Estudos realizados com polímeros reforçadas com fibra de curauá mostraram que os compósitos com uma concentração de fibra acima de 10% possuem alta tenacidade, e isso se deve a ruptura incompleta da amostra devido a flexibilidade de dobra das fibras. Também se observou que o aumento da quantidade de fibras influencia diretamente no comportamento mecânico do compósito, pois uma amostra com epóxi puro obteve menor resistência que o compósito reforçado com 30% de fibra de curauá (MONTEIRO *et al.*, 2013; MACIEL *et al.*, 2018). Algumas pesquisas também propuseram a fabricação de compósitos cimentícios reforçadas com fibra de curauá, ou seja, materiais voltados para aplicação em fachadas, reparos e com funções estruturais (SOLTAN *et al.*, 2017; ZUKOWSKI *et al.*, 2018).

Embora haja uma crescente movimentação da comunidade científica em busca de alternativas de menor impacto ambiental, até o momento, não há registros de pesquisas empenhadas em explorar o potencial de resinas e fibras provenientes de fontes renováveis no contexto da fabricação de conectores de cisalhamento destinados a painéis sanduíche de concreto. Nesse cenário, surge uma oportunidade promissora para investigar e desenvolver soluções mais sustentáveis. A exploração de materiais oriundos de fontes renováveis para a produção de conectores poderia resultar em redução substancial do impacto ambiental associado a esse componente crucial das edificações. Portanto, há um espaço valioso para futuras pesquisas focadas na criação de conectores de cisalhamento para painéis sanduíche de concreto que sejam tanto eficientes energeticamente quanto ambientalmente responsáveis.

Anteriormente, investigações foram realizadas com o intuito de produzir conectores de cisalhamento de PRF para painéis sanduíche de concreto (SILVA, 2020; ARAÚJO, 2023). No entanto, estas pesquisas sempre se limitaram a produzir conectores do tipo PerfoFRP com mantas de fibras curtas picotadas (*Chopped Strand Mat*, CSM), através do processo de infusão à vácuo. Enquanto o trabalho de Silva (2020) utilizou conectores constituídos por resina

poliéster e fibra de vidro, o trabalho de Araújo (2023) utilizou fibras de curauá. Apesar dos conectores PerfoFRP serem simples, de fácil produção e utilização, eles possuem a limitação de consumirem uma quantidade grande de material e desperdiçarem material durante a sua produção devido ao processo de furação. O presente trabalho teve o desafio de ser o primeiro do grupo de pesquisa a explorar novos tipos de resinas, inclusive produzindo conectores com resinas de menor impacto ambiental, de origem renovável. Também foi o primeiro trabalho a produzir conectores do tipo rede, com fibras de curauá contínuas.

Essa dissertação está estruturada em cinco seções, sendo a primeira delas essa introdução. A segunda seção, intitulada revisão bibliográfica, traz toda a fundamentação teórica para pesquisa e aborda temas como as definições de painel sanduíche, conectores de cisalhamento e compósitos poliméricos, além das pesquisas desenvolvidas nessas áreas. A terceira seção corresponde ao programa experimental, onde são explicados todos procedimentos e testes realizados na pesquisa para alcançar os objetivos traçados. A quarta seção apresenta os dados e explicações para os resultados obtidos nos ensaios de cada material. E, a quinta e última seção traz as conclusões que puderam ser extraídas sobre propriedades e comportamento dos materiais aplicados no programa experimental.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral dessa pesquisa é determinar o comportamento mecânico dos conectores do tipo rede reforçados com fibra de curauá quando submetidos ao cisalhamento, através de dados obtidos na realização de ensaios *push-out* em modelos experimentais que representem paredes de painéis sanduíches de concreto.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos dessa pesquisa consistem em:

- Determinar as propriedades das resinas do óleo da mamona, poliéster e epóxi a serem utilizadas na fabricação dos compósitos;
- Avaliar o desempenho do reforço de curauá no comportamento mecânico à tração dos compósitos produzidos com diferentes matrizes;
- Propor uma metodologia de produção de conectores formados por rede de compósito polimérico reforçado com fibra de curauá fazendo-se uso do processo de infusão à vácuo;
- Determinar o comportamento ao cisalhamento de conexões formadas pelo conector proposto aplicados em blocos de concreto representativos dos painéis sanduíche.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados conceitos e referências teóricas para embasamento e desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1. PAREDES DE PAINEL SANDUÍCHE

Os painéis do tipo sanduíche geralmente são formados por duas placas externas de concreto e um núcleo de material isolante, interligados entre si por conectores (Figura 1). Este é um sistema que pode ser utilizado com a função somente de vedação ou com função estrutural através da transferência de esforços, além de fornecer isolamento térmico e acústico para a edificação (PCI, 2011).

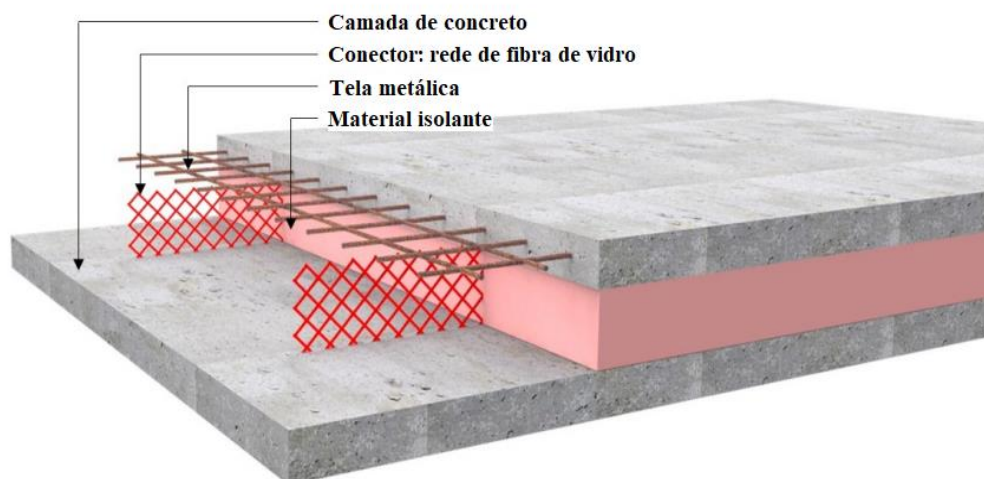


Figura 1 – Painel sanduíche de concreto com conector em rede de fibra de vidro (KIM e YOU, 2015).

Os painéis sanduíche é um sistema que surgiu para substituir o método construtivo tradicional, oferecendo para isso uma construção rápida, segura e com eficiência energética (MOHAMAD; MAHDI, 2011). Na construção civil esses painéis são comumente utilizados como paredes externas, mas vêm sendo empregados também como paredes divisórias internas, principalmente em ambientes que necessitam de controle de temperatura (PCI, 2011).

O PCI Committee Report (2011) ainda explica que como os painéis sanduíche oferecem ambientes com vãos amplos e paredes rígidas, duráveis, econômicas, resistentes ao fogo e com significativa eficiência energética, eles são encontrados em estruturas das mais diversas finalidades, como edifícios residenciais e industriais, escolas, escritórios e hospitais. Já Frankl

*et al.* (2011) aponta como vantagem estrutural dos painéis sua capacidade de resistir a carregamentos gravíticos de pisos, cargas normais e transversais provenientes da ação do vento.

Por outro lado, os painéis sanduíche têm a desvantagem de serem bastante pesados. Geralmente, eles são fabricados com concreto armado e possuem espessuras superiores a 300mm, o que resulta em um peso de cerca de 500kg/m<sup>2</sup> de área de parede. O peso elevado restringe seu uso a edificações de baixa altura, para facilitar a montagem das peças (O'HEGARTY; KINNANE, 2020). Também é preciso considerar que, por se tratar de um sistema construtivo relativamente novo, engenheiros projetistas e construtores ainda se apoiam na construção tradicional (AZEVEDO, 2013).

### **2.1.1. Principais constituintes**

#### **2.1.1.1. Camadas de concreto**

O concreto é o material mais utilizado como camada externa dos painéis sanduíche e consiste na parte estrutural do sistema, podendo ser armado ou protendido (AZEVEDO, 2013). Em ambos os casos, é essencial que a armadura de aço possua um revestimento adequado para proteção contra corrosão. Assim, muitas vezes, o revestimento da armadura de aço torna-se um fator determinante na definição da espessura do painel projetado (O'HEGARTY; KINNANE, 2020).

Para evitar que o revestimento da armadura de aço seja uma limitação na produção dos painéis, Azevedo (2013) sugere a substituição da armadura por fibras de aço inseridas durante a fase de produção do concreto. Sendo possível obter painéis com maior durabilidade, com espessura reduzida e um material mais dúctil quando comparado com o concreto simples, pois a adição das fibras melhora o comportamento após a fissuração. Além disso, o concreto com fibra de aço será autocompactável, apresentando vantagens econômicas, como a dispensa da dobragem da armadura e a vibração do concreto, sendo capaz de fluir quando colocado nas formas devido ao efeito de seu próprio peso.

Bertini (2002) discute sobre os benefícios da substituição do concreto por argamassa, sendo uma alternativa utilizada na construção de edificações. Esses painéis sanduíche são geralmente moldados no local e consistem em um núcleo de EPS e placas de argamassa. O autor também relata que a largura das telas soldadas ultrapassa em 15cm a largura do EPS, gerando a emenda para o próximo painel. Quando os painéis são conectados na posição correta, eles recebem o revestimento de argamassa que varia de 2,5 a 3,8cm de espessura em cada lado

do núcleo. Essa configuração oferece um bom desempenho estrutural e tem um valor econômico competitivo com o modelo de construção tradicional.

#### 2.1.1.2. Camada isolante

Dependendo da finalidade da aplicação, existem vários materiais utilizados como camada isolante, incluindo fibra de vidro, lã e o poliestireno. Sendo que, o poliestireno extrudado (XPS) e a espuma de poliestireno expandido (EPS) são utilizados com mais frequência na fabricação de painéis sanduíche, pois possuem alto desempenho térmico e trabalhabilidade (KIM; YOU, 2015).

A espessura da camada isolante depende das propriedades térmicas do material utilizado (Figura 2) e é determinada com base nas condições de execução da obra e no nível de isolamento térmico desejado. Também é imprescindível que o material isolante possua baixa capacidade de absorção de água, para evitar que ele absorva a água utilizada na preparação do concreto (AZEVEDO, 2013).

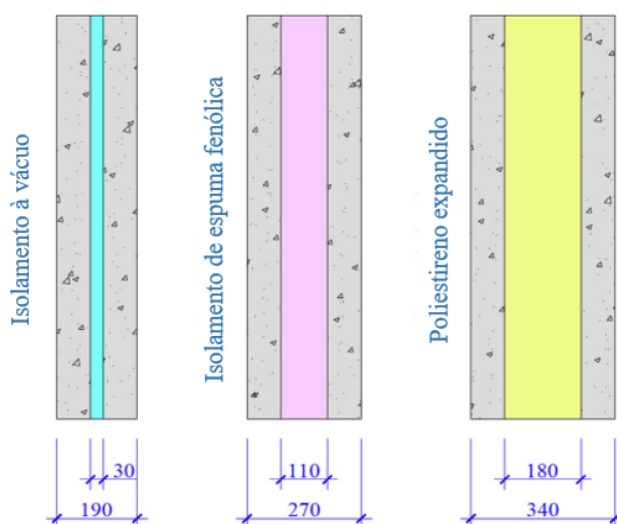


Figura 2 – Espessura de isolamento necessária para resistir a transmitância térmica de  $0.18\text{W}\times\text{m}^{-2}\times\text{K}^{-1}$  usando diferentes materiais (dimensões em mm) (O’HEGARTY e KINNANE, 2020).

Além disso, o tipo de material utilizado na camada isolante exerce influência no desempenho estrutural do painel, pois sua capacidade de resistir aos esforços de cisalhamento no plano depende diretamente da eficácia da ligação entre o isolamento e a camada de concreto (KIM; YOU, 2015). No entanto, a capacidade de alguns isolamentos resistirem à esforços de corte é usualmente ignorada pelos projetistas, assumindo que a componente estrutural do núcleo é deteriorada durante o transporte e manuseamento do painel ou ao longo do seu ciclo de vida (AZEVEDO, 2013).

### 2.1.1.3. Elemento de ligação – conectores

Os conectores são utilizados na produção dos painéis sanduíches com o intuito de unir as camadas de concreto e manter a espuma de isolamento na posição correta. Esses elementos de ligação podem ser divididos em duas categorias: conectores simples e conectores de cisalhamento (PCI, 2011).

Os conectores simples conseguem transferir esforços de tração ou compressão entre as camadas do painel, evitando que as camadas de concreto e de isolamento separem durante a desforma, manuseio ou ação do vento. Já os conectores de cisalhamento são aqueles que transferem o cisalhamento longitudinal, resultante da flexão do painel, de uma camada para outra, podendo resistir em uma ou duas direções (EINEA *et al.*, 1991). Os conectores unidirecionais são projetados para serem rígidos em uma direção e flexíveis em outra, por exemplo, treliças de aço, pinos e barras dobradas. Já os conectores bidirecionais são rígidos nas duas direções e, conseqüentemente, transferem tanto esforços de cisalhamento longitudinal quanto transversal, exemplo disso são zonas sólidas de concreto, placas de ligação e luvas cilíndricas (PCI, 2011).

Os conectores ainda podem ser classificados de acordo com sua disposição dentro do painel. Conectores contínuos são dispostos ao longo de todo comprimento ou altura do painel, enquanto os conectores discretos possuem um comprimento reduzido e são posicionados estrategicamente nos painéis de forma a garantir bons resultados de resistência e rigidez (LAMEIRAS, 2015).

A disposição e o espaçamento dos conectores dentro dos painéis dependem de diversos fatores como o nível de ação compósita, as cargas aplicadas, o tipo de conector utilizado e o vão total do painel (EINEA *et al.*, 1991). Apesar da pesquisa mostrar que não existem regras na organização dos conectores, a literatura atual disponibiliza algumas orientações sobre o assunto (Sopal, 2013; Yang *et al.*, 2019).

Em relação as formas e materiais empregados na fabricação, os conectores passaram por uma evolução ao longo do tempo. Segundo Olsen (2017), os painéis sanduíches propostos entre 1906 e a década de 1990 possuíam componentes semelhantes, com conectores das mais diversas configurações (Figura 3) e confeccionados com aço ou nervuras de concreto que ligavam diretamente as duas camadas externas.



Figura 3 – Diferentes formatos de conectores usados em painéis sanduíches (OLSEN, 2017).

Porém, o uso do aço e concreto, devido à sua elevada condutibilidade térmica, permitia a transferência de calor entre as paredes do painel, reduzindo sua eficiência térmica. Com o intuito de resolver o problema das pontes térmicas e explorar materiais menos susceptíveis a degradação causada pela ação do clima e do tempo, pesquisadores passaram a propor o uso de conectores fabricados com polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) (O'HEGARTY; KINNANE, 2020). Alguns modelos de conectores PRFV são apresentados na Figura 4.



Figura 4 – Modelos de conectores de PRFV (OLSEN, 2017).

Como exemplo, temos o sistema de parede sanduíche pré-moldada proposto pela Universidade do Nebraska, que pleiteava ser um sistema térmica e estruturalmente eficiente e para isso demandava características como: conectores rígidos e resistentes suficientes para desenvolver ação totalmente compósita, conectores com alta resistência térmica e não poderia ocorrer transposição do concreto na camada isolante (EINEA *et al.*, 1994).

Os conectores FRP que atendiam tais características incluía uma viga de alma cheia, tiras dispostas diagonalmente e barras dobradas. As barras de FRP dobradas foram selecionadas por requererem uma instalação mais simples, fornecerem melhor ancoragem ao concreto e custos reduzidos (Figura 5). Nos painéis, foram conduzidos ensaios de cisalhamento puro e flexão em escala reduzida e também testes de flexão em escala real. Os resultados mostraram que os conectores de barras de FRP dobradas apresentaram resistência térmica significativa e o painel teve um desempenho estrutural satisfatório, atingindo a resistência necessária para desenvolver um elevado nível de ação compósita (EINEA *et al.*, 1994).

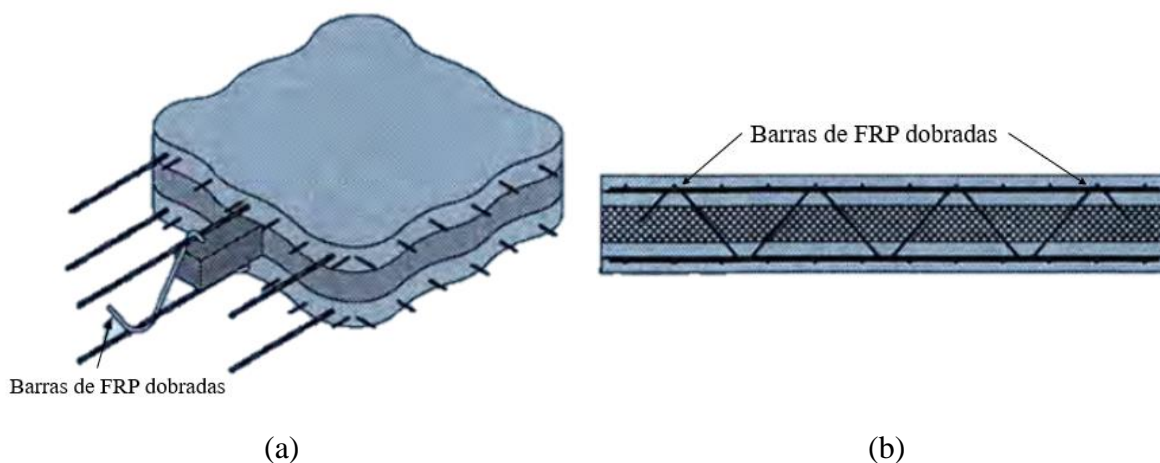


Figura 5 – Barra de FRP dobrada: (a) apresentada no painel sanduíche cortado; (b) vista transversal (EINEA *et al.*, 1994).

Seguindo o mesmo conceito, no ano de 2003, o *AltusGroup* introduziu ao mercado o primeiro painel sanduíche totalmente compósito e termicamente eficiente, construído com uso de conectores de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) (Gleich, 2007). Segundo o autor, a empresa de pré-moldados utilizou conectores de cisalhamento produzidos com resina epóxi e reforçados com fibras de carbono, pois o material possui uma condutividade térmica baixa, reduzindo a taxa de transferência de calor entre as camadas de concreto. A Figura 6 apresenta a seção transversal do painel com conectores de PRFC desenvolvido pelo *AltusGroup*.

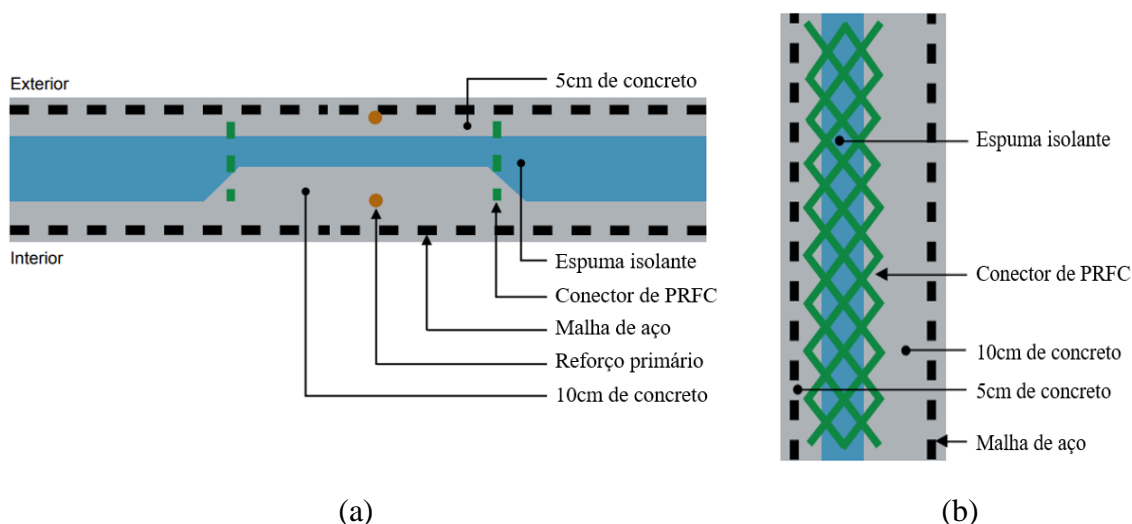


Figura 6 – Vistas do painel sanduíche reforçado com conector de PRFC da *AltusGroup*: (a) planta; (b) corte vertical (GLEICH, 2007).

A empresa também inovou em relação ao formato do conector. O modelo fabricado possuía o formato de rede, comercialmente conhecido como C-GRID, e consistia em tiras poliméricas reforçadas com tiras de carbono com aproximadamente 6 mm de largura por

1,6 mm de espessura dispostos ortogonalmente. No interior do painel sanduíche, os conectores foram dispostos na diagonal, permitindo o desenvolvimento de um mecanismo de treliça (Figura 7) (FRANKL, 2008).

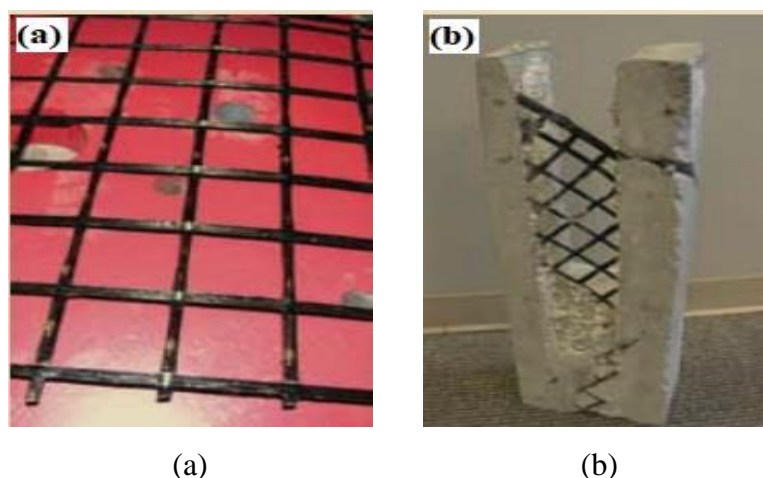


Figura 7 – Conector de cisalhamento de PRFC: (a) amostra do conector no formato em rede; (b) C-GRID numa seção retirada de um painel testado (FRANKL *et al.*, 2011).

Para Frankl *et al.* (2011), o uso do PRFC como mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento melhora a eficiência do isolamento térmico, a vida útil e a capacidade estrutural de painéis pré-moldados. Em sua pesquisa experimental, os autores mostraram que as conexões de PRFC no formato de rede alcançaram valores de ação compósita próximos a 100% com o uso do EPS ou espuma de XPS. Além disso, todos os painéis suportaram cargas superiores as cargas de projeto e apresentaram grandes deformações antes da ruptura, o que para os pesquisadores ressalta que a escolha apropriada da quantidade de conectores e sua configuração é fundamental para alcançar o desempenho estrutural ideal.

Pesquisas utilizando os conectores de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) continuaram a ser desenvolvidas com o intuito de compreender melhor a influência da geometria e do material no desempenho estrutural do painel sanduíche (SOPAL, 2013; NAFADI *et al.*, 2021). Algumas vezes, os conectores sugeridos possuem uma geometria similar aos conectores do tipo rede estudados por outros pesquisados (GLEICH, 2007; FRANKL, 2008; FRANKL *et al.*, 2011), mas diferem no material, substituindo o reforço de fibra de carbono por reforço de fibra de vidro, como Kim e You (2015). A Figura 8 apresenta um conector do tipo rede polimérico, sendo um de fibra de carbono, estudado por Sopal (2013) e Nafadi *et al.* (2021) e outro de fibra de vidro, analisado em Kim e You (2015).



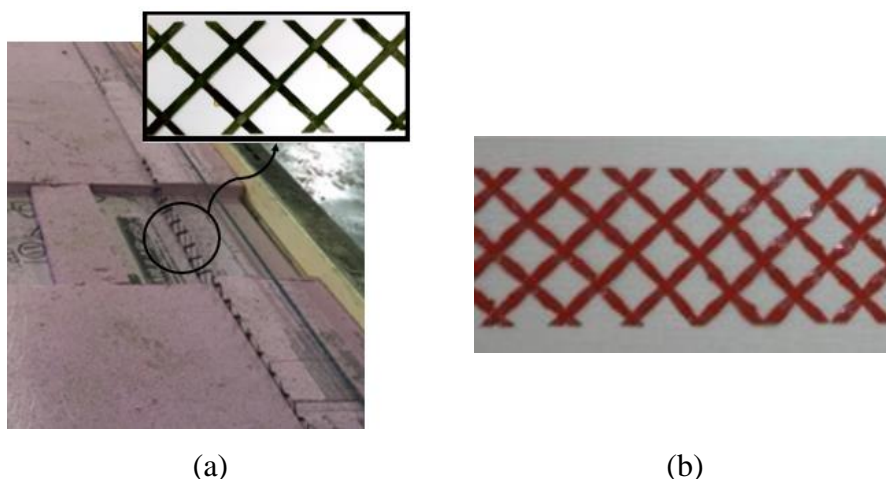


Figura 8 – Conector polimérico do tipo rede: (a) fibra de carbono utilizada por Sopal (2013) e Nafadi *et al.* (2021); (b) fibra de vidro utilizada por Kim e You (2015).

Embora várias pesquisas analisem o formato de rede para conexão de cisalhamento, o formato com barras de polímero dobradas também continuou sendo pesquisado. Por exemplo, Tomlinson *et al.* (2016) investigaram as propriedades do sistema de conexão de cisalhamento constituído de vergalhões dobrados de polímero reforçado com fibras de basalto (PRFB) e compararam o comportamento com o reforço de aço (Figura 9). Os parâmetros analisados foram o diâmetro e a inclinação dos vergalhões, a direção do carregamento com o conector em tração ou compressão e a aderência entre o isolamento e o concreto.



Figura 9 – Material e diâmetro dos vergalhões usados como conectores de cisalhamento (TOMLINSON *et al.*, 2016).

Dentre os resultados obtidos, os autores observaram que, para os conectores de PRFB sob tração ou compressão, o incremento do diâmetro provocou um aumento na capacidade de carregamento final e da rigidez em todas as configurações testadas. Estes conectores também se mostraram mais fracos quando submetidos a compressão do que a tração. Ainda assim, quando submetidos a tração, todos os conectores de PRFB sofreram ruptura por arrancamento,



exceto os de menor diâmetro (4mm) e maior inclinação (60°), cuja ruptura se deu com o aumento do comprimento embutido nas camadas de concreto.

Os pesquisadores também relatam que tanto nos conectores de PRFB quanto os de aço, para diâmetros entre 6mm e 8mm, o aumento da inclinação da conexão resultou em um aumento na capacidade última e na rigidez. Em contrapartida, para conexões de PRFB com diâmetros de 4mm, o incremento da inclinação reduziu a capacidade de carregamento final. Por fim, notou-se que os dois tipos de conexões possuem resistência a tração semelhantes para diâmetros de 6mm. Sendo que os conectores de PRFB foram arrancados, enquanto os de aço cederam e depois romperam. Já na compressão, os conectores de aço, que se dobraram, apresentaram o dobro de força em relação aos de PRFB, que em sua maioria foram esmagados.

### **2.1.2. Comportamento estrutural**

O dimensionamento de paredes pré-moldadas de painéis sanduíche é realizado da mesma maneira que para outros elementos pré-moldados de concreto. Deve-se levar em consideração as tensões resultantes do armazenamento, transporte e montagem; bem como as tensões admissíveis e deformações resultantes das condições de uso (PCI, 2011).

O sucesso no dimensionamento do painel sanduíche é obtido assegurando-se que o comportamento estrutural considerado para o projeto está condizente, o máximo possível, com o comportamento real do painel. Isso porque, o que se conhece atualmente sobre o comportamento dos painéis sanduíche é baseado em observações e estudos experimentais, que algumas vezes apresentam opiniões divergentes a respeito do desempenho do painel, da eficiência na transferência de esforço dos conectores de cisalhamento e do efeito do tipo de isolamento (PCI, 2011).

Para um bom dimensionamento, também é primordial conhecer o grau de ação compósita dos painéis, que representa o nível de interação entre as diferentes camadas das quais é constituído. O grau de ação compósita depende da tipologia, geometria, propriedades dos materiais e, principalmente, da capacidade de transferência dos esforços de cisalhamento entre as camadas do painel, podendo estes serem projetados como totalmente compósitos, parcialmente compósitos e não compósitos (AZEVEDO, 2013).

Nos painéis não compósitos, as duas camadas de concreto atuam de forma independente, pois a resistência e rigidez dos conectores não são suficientes para transferir os esforços, e o momento de flexão é calculado considerando que a carga é distribuída proporcionalmente entre cada camada do painel, como representado na Figura 10(a) (O'HEGARTY; KINNANE, 2020).

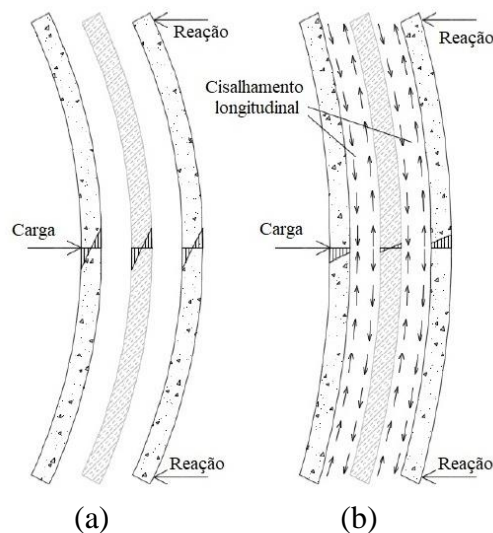


Figura 10 – Distribuição de carga no painel sanduíche: (a) não composto; (b) composto. Adaptado de Lameiras (2015).

Na ação compósita, os esforços de cisalhamentos são transferidos pelos conectores entre as camadas e elas resistem juntas as cargas aplicadas (ver Figura 10(b)). O momento de inércia para um painel composto depende da localização do eixo neutro (E.N.) do painel, que por sua vez, depende da espessura de cada camada (O’HEGARTY; KINNANE, 2020). O momento de inércia é calculado conforme equação 1.

$$I_c = \frac{bt_1^3}{12} + bt_1y_1^2 + \frac{bt_2^3}{12} + bt_2y_2^2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- $b$  = largura do painel;
- $t_1$  e  $t_2$  = espessura das camadas de concreto (ver Figura 11);
- $y_1$  e  $y_2$  = distâncias do eixo neutro de cada camada de concreto para o eixo neutro do painel completo (ver Figura 11).

A Figura 11 apresenta as dimensões relevantes para o projeto de um painel sanduíche pré-moldado. A imagem também mostra a distribuição de carga para um carregamento pontual para o caso de um painel não composto. Neste caso, a carga atuante nas camadas de concreto depende do momento de inércia dessas camadas ( $I_1$  e  $I_2$ ), determinado conforme a geometria da seção transversal do painel.

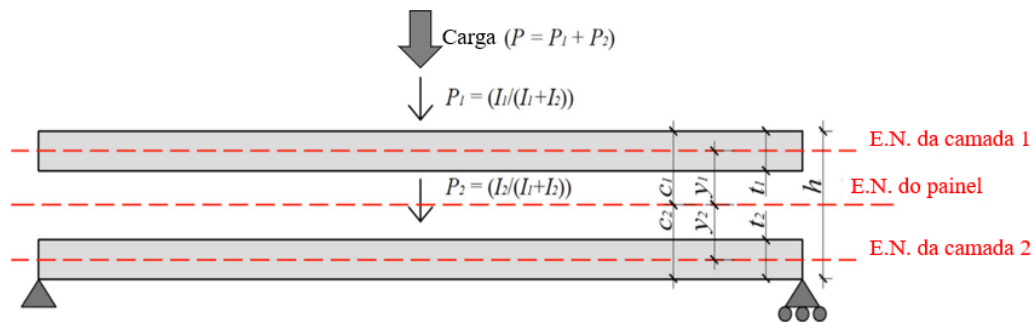


Figura 11 – Dimensões e eixo neutro para painéis sanduíche composto e não composto. Distribuição de carga em painéis não compostos (O’HEGARTY E KINNANE, 2020).

Alguns painéis ainda podem apresentar um comportamento parcialmente composto. Nesse caso, os painéis possuem conectores de cisalhamento ligando as camadas do sistema, mas eles não fornecem rigidez e resistência suficientes para uma ação totalmente composta (PCI, 2011). Um exemplo disso são os painéis com isolamento de XPS estudados por Kim e You (2015), que apresentaram graus de ação composta de 15-64% até atingirem o carregamento máximo 25-60kN, dependendo da quantidade de conectores utilizada. Depois da ruptura, os painéis trabalharam com ação não composta.

Nafadi *et al* (2021) relata que o aumento da ação composta dos painéis provoca um aumento em sua eficiência estrutural, porém, reduz significativamente sua eficiência térmica devido a transferência de calor através dos conectores. McCall (1985) mostrou que o uso de um conector de aço correspondente a 0.08% da área do painel sanduíche, causa uma redução de 38% na eficiência térmica se comparados a painéis sem conectores. Assim, os painéis não compostos, mesmo com eficiência estrutural reduzida, tornaram-se muito atraentes devido aos seus benefícios térmicos e características arquitetônicas.

Na prática, a maioria dos painéis são dimensionados para serem parcialmente compostos, pois o objetivo é combinar os benefícios da resistência oferecido pela interação total entre as camadas, garantindo um bom desempenho estrutural, e a eficiência térmica dos conectores de base polimérica.

## 2.2. COMPORTAMENTO DOS CONECTORES DE CISALHAMENTO

O comportamento estrutural e capacidade de carga dos conectores de cisalhamento podem ser determinados através de ensaios denominado *push-out*. Atualmente, não há uma norma específica para o ensaio *push-out* em conectores de cisalhamento, então as pesquisas que visam determinar a resistência desses conectores, normalmente, baseiam-se na norma europeia

EN 1994-1-1 (2004), que define as diretrizes para determinar a capacidade resistente de estruturas mistas de aço e concreto.

Por exemplo, a norma apresenta um modelo de ensaio que consiste em duas camadas de concreto armado com dimensões de  $600\text{mm} \times 650\text{mm} \times 150\text{mm}$  conectadas por um perfil I de aço fixado no concreto pelos conectores que serão avaliados, como é possível ver na Figura 12(a). Na execução do ensaio, as camadas de concreto são apoiadas na parte inferior e o carregamento é aplicado na parte superior do perfil de aço, como descrito na Figura 12(b).

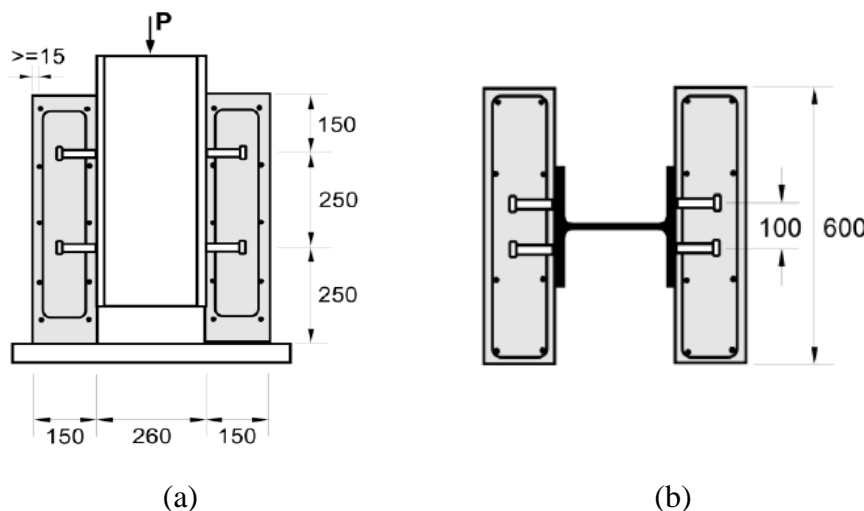


Figura 12 – Corpo de prova para ensaio *push-out* conforme EN 1994-1-1 (2004) (dimensões em mm): (a) vista frontal; (b) vista superior.

Lameiras (2015), em sua tese de doutorado intitulada “*Sandwich structural panels comprising thin walled SFRCC and GFRP connectors: from materials features to structural behavior*”, propôs um painel sanduíche pré-fabricado composto por duas camadas de concreto autocompactável reforçado com fibra de aço (SFRCC) ligadas entre si por conectores de cisalhamento do tipo PerfoFRP. Os conectores PerfoFRP consistiam em chapas de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), possuíam dimensões de  $125\text{mm} \times 350\text{mm}$  (largura  $\times$  altura) e foram perfuradas lateralmente para ancoragem nas camadas de concreto do painel analisado (ver Figura 13(b)).

Para determinar a resistência dos conectores PerfoFRP, Lameiras (2015) realizou ensaios *push-out* seguindo as recomendações da norma EN 1994-1-1 (2004), a configuração do sistema de ensaio é apresentada na Figura 13(a). As dimensões e disposições dos corpos de prova foram definidas de forma a se adequarem as conexões propostas para o painel sanduíche. Então, foram adotadas camadas de concreto com 400mm de largura, 400mm de altura e 60mm de espessura, ligadas entre si pelos conectores PerfoFRP sustentados por perfis metálicos. Além disso, o autor destaca que a espessura de 60mm foi definida com base em estudos paramétricos

que verificou que essa medida é suficiente para a ancoragem do conector PerfoFRP e para garantir a estabilidade estrutural do painel sanduíche.

A junção dos conectores foi realizada através de dois perfis metálicos tipo U, denominados UPN 140 (classificação europeia), que possuem 140mm de altura, 350mm de comprimento e massa linear de 16kg/m. Os conectores PerfoFRP foram posicionados entre os dois perfis metálicos dispostos opostamente, formando um perfil I, e fixados através de parafusos, como pode ser observado na Figura 13(c). A conexão formada pelos perfis UPN 140 e os conectores foi posicionada a 50mm acima da superfície superior das camadas de SFRSCC (ver Figura 13(d)), afim de garantir um espaço adequado para aplicação do carregamento e alcançar o máximo do deslizamento.

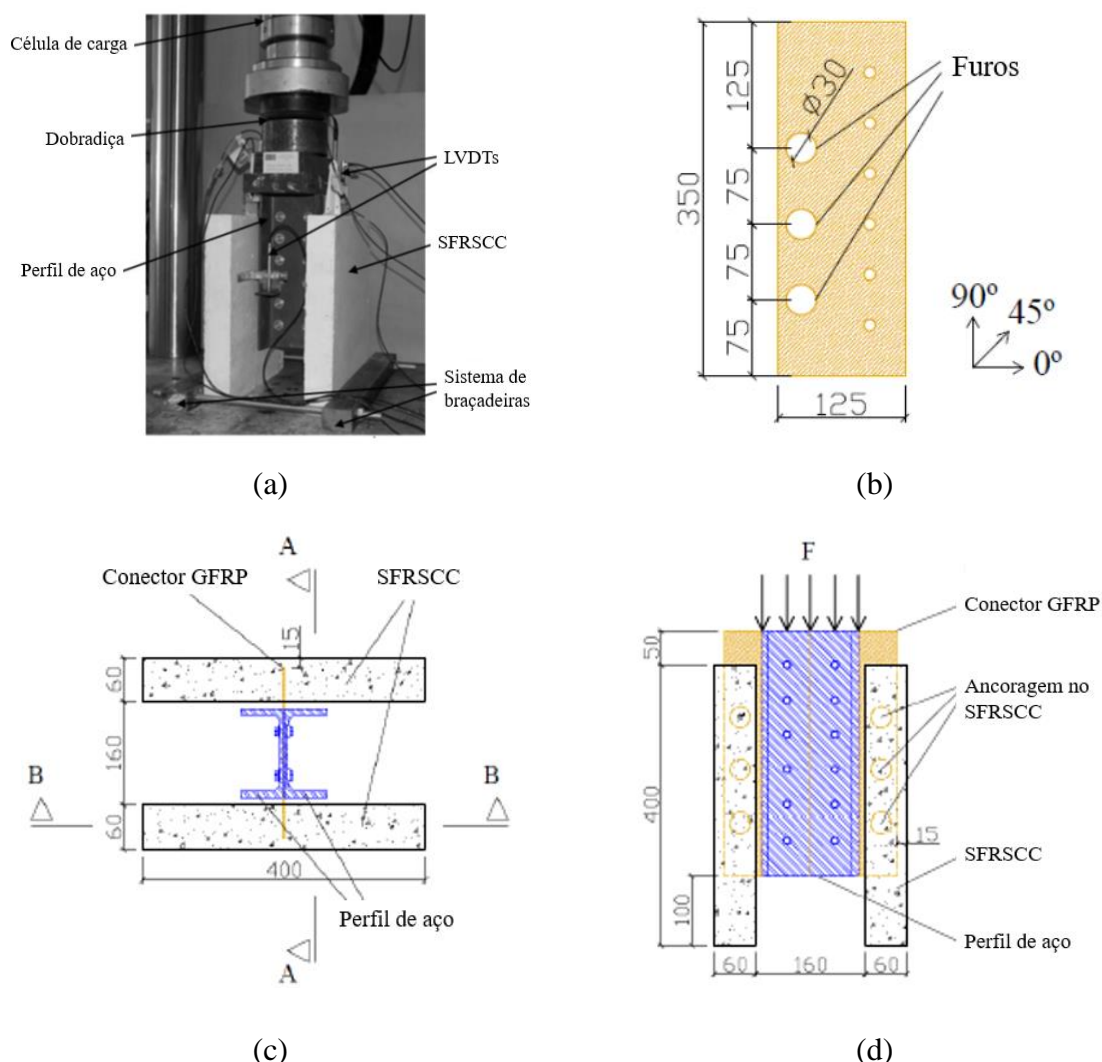


Figura 13 – Ensaio *push-out* (dimensões em mm): (a) configuração do ensaio; (b) conector PerfoFRP; (c) vista em planta do corpo de prova; (d) Corte AA do corpo de prova. Adaptado de Lameiras, 2015.

A amostra analisada por Lameiras (2015) consistia em 2 espécimes para cada série ensaiada. Os espécimes foram classificados no formato “XH-YYY-ZZ”, onde “X” corresponde

ao número de furos no conector (0 ou 3), “Y” indica o tipo de PRFV (CSM ou MU4) e “ZZ” refere-se ao uso, ou não, do efeito de topo (*end-bearing effect*) (WO ou EB). A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios *push-out* dos conectores PerfoFRP estudados por Lameiras (2015).

Tabela 1 – Resultados dos ensaios *push-out* realizados por Lameiras (2015).

Identificação	Força (kN)		Deslocamento (mm)	
	Média	CoV (%)	Médio	CoV (%)
0H-CSM-WO	29.40	8.00	0.75	9.00
0H-CSM-EB	66.60	9.00	2.30	19.00
0H-MU4-WO	46.80	14.00	0.30	5.00
0H-MU4-EB	94.60	22.00	0.92	52.00
3H-CSM-WO	40.10	14.00	1.17	29.00
3H-CSM-EB	76.90	13.00	1.56	20.00
3H-MU4-WO	66.50	22.00	0.92	6.00
3H-MU4-EB	122.20	3.00	3.22	66.00

Com base nos resultados, Lameiras (2015) concluiu que a presença dos furos nas chapas poliméricas aumentou, em média, 29% a resistência dos conectores PerfoFRP. Esse efeito foi atribuído, principalmente, a formação de pinos de concreto que preencheram os furos do conector (ver Figura 13(d)). Esse efeito também garantiu elevada aderência entre o conector e o concreto, sendo responsável por 38% da capacidade resistente das conexões. Quanto a influência do reforço de fibra de vidro, o uso do MU4 em vez do CSM aumentou, em média, a capacidade de carga dos conectores em 55%, sendo mais seu efeito mais significativo nos conectores com furos. O *end-bearing effect* também se mostrou relevante, pois aumentou a capacidade de carga dos conectores em 97% em relação aos corpos de prova sem a nervura.

Naito *et al.* (2012) já haviam realizado um estudo experimental com sistema de ensaio *push-out* semelhante à norma e ao de Lameiras (2015) para determinar a resistência de 14 diferentes tipos de conectores de cisalhamento disponíveis comercialmente nos Estados Unidos para uso em painel sanduíche. Porém, em vez de usar o perfil metálico para ligar as camadas externas, os autores utilizaram uma camada intermediária de concreto com 127mm de largura. Com isso, foi obtido um corpo de prova com dimensões de 127mm × 127mm × 457mm (comprimento × largura × altura) que representa dois painéis sanduíches interligados, como pode ser observado na Figura 14.



Figura 14 – Configuração do ensaio *push-out* (NAITO *et al.*, 2012).

Nos corpos de prova de concreto produzidos por Naito *et al.* (2012), foram utilizadas duas camadas de XPS com 50mm de espessura como material isolante, exceto nos corpos de prova do grupo de conexão D, que consiste em conectores do tipo rede, sendo mais comum o uso do EPS. Portanto, para fins de comparação, os conectores do tipo rede foram testados com isolamento de XPS e EPS. Além disso, foram realizados ensaios de cisalhamento duplo (*push-out*) em uma amostra composta tanto por conectores termicamente eficientes de base polimérica como por conectores de aço. A Figura 15 apresenta a geometria dos conectores estudados.

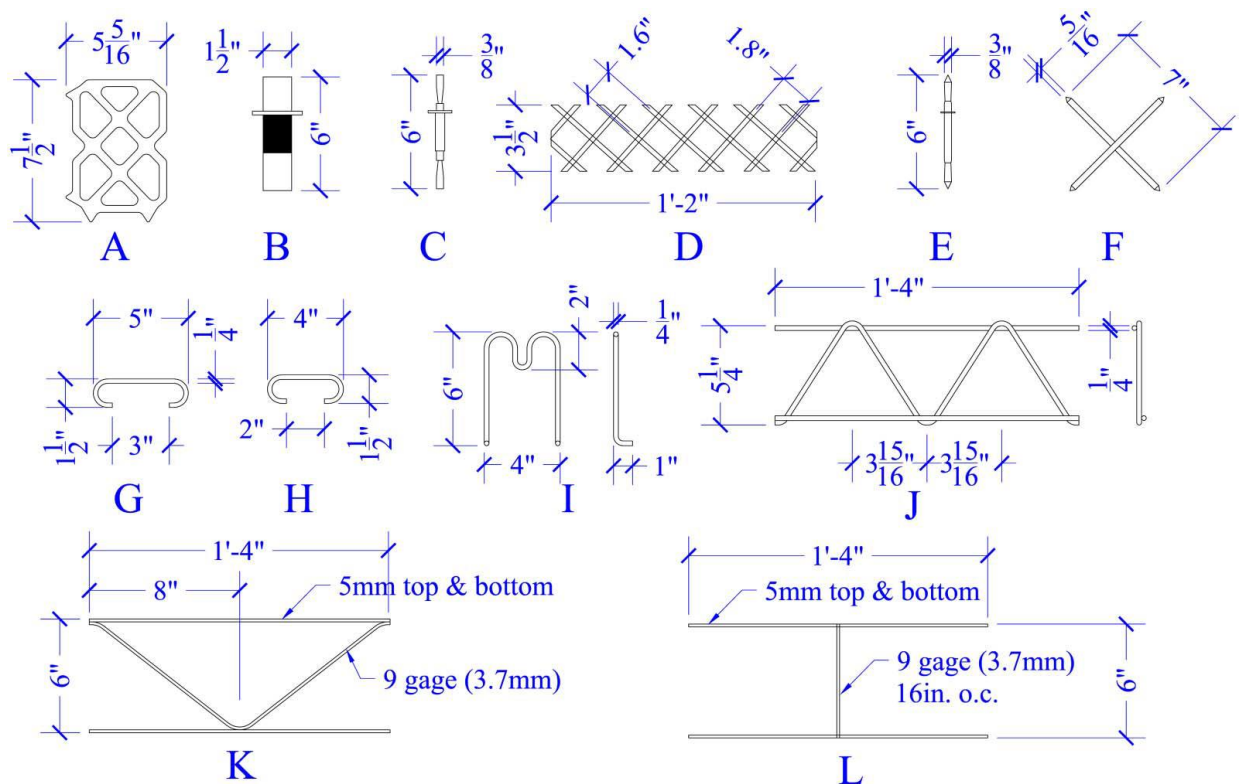


Figura 15 – Dimensões dos conectores de cisalhamento (1in = 25.4mm) (NAITO *et al.*, 2012).

No total, foram realizadas três ensaios para cada grupo de conector analisado, com exceção dos conectores D-1 que tiveram 2 testes, H-1 com 1 teste e H-2 com 4 testes. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios experimentais de Naito *et al.* (2012), onde os valores de força e deslocamento correspondem a média de cada grupo de conector obtida a partir dos valores individuais dos ensaios.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios *push-out* conduzidos por Naito *et al.* (2012).

Identificação	Tipo	Força Máxima		Deslocamento (mm)
		Média (kN)	CoV (%)	
A	Grade de PRFV	11.46	5.20	1.68
B	Pino compósito de PRFV	12.09	2.70	8.91
C	Pino não-compósito de PRFV	4.62	11.00	25.26
D-1	Conector de rede de PRFC com EPS	14.48	N.A.	1.52
D-2	Conector de rede de PRFC com XPS	11.98	21.10	3.80
E	Pino de PRFV	3.23	16.30	19.83
F	Barras cruzadas de PRFB	7.29	32.00	15.48
G	Clipe em formato “C” de aço carbono	15.16	24.30	30.38
H-1	Clipe em formato “C” de aço galvanizado	3.59	N.A.	25.76
H-2	Clipe em formato “C” de aço inoxidável	5.52	22.80	18.47
I	Clipe em formato “M” de aço galvanizado	18.41	18.80	37.43
J	Treliça de aço 1008	23.48	13.10	1.06
K	Treliça única triangular de aço galvanizado por imersão à quente	9.13	0.10	11.41

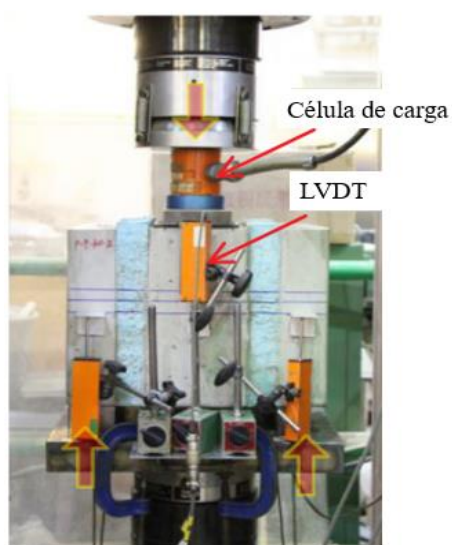


L	Treliça única retangular de aço galvanizado por imersão à quente	6.96	16.00	23.14
---	--	------	-------	-------

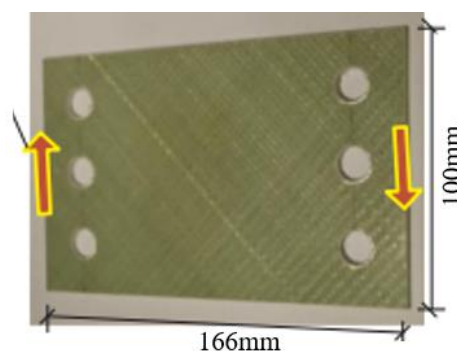
Naito *et al.* (2012) concluíram que os conectores de cisalhamento têm um desempenho significativo no comportamento dos painéis, mas que a capacidade de carga é bastante variável indo de 3.23kN a 23.48kN. Ademais, a variação dos modelos dos conectores indicou que a rigidez dos painéis após fissuração depende do tipo e da geometria do conector utilizado. Conectores mais flexíveis resultam em menor rigidez pós fissuração, mas nestes casos, a resistência máxima do painel não sofre grandes modificações.

Seguindo essa mesma configuração para o ensaio *push-out*, Huang e Dai (2019) testaram a resistência ao cisalhamento de conectores PRFV para painel sanduíche de concreto pré-moldado (Figura 16(a)). Os conectores PRFV eram semelhantes aos conectores PerfoFRP de Lameiras (2015) e consistiam em uma chapa plana perfurada lateralmente para ancoragem nas camadas de concreto e possuíam 166mm de largura e 100mm de altura (Figura 16(b)).

Os corpos de prova de concreto de Huang e Dai (2019) também eram constituídos de três camadas de concreto, tinha as medidas de 400mm × 300mm × 300mm (comprimento × largura × altura), representando dois painéis sanduíches interligados, como pode ser observado na Figura 16(c). Foram usadas duas camadas isolantes de XPS, com espessura de 50 mm para atingir a eficiência térmica almejada, e foi inserida uma folha de plástico para diminuir a aderência entre o concreto e o isolamento.



(a)



(b)

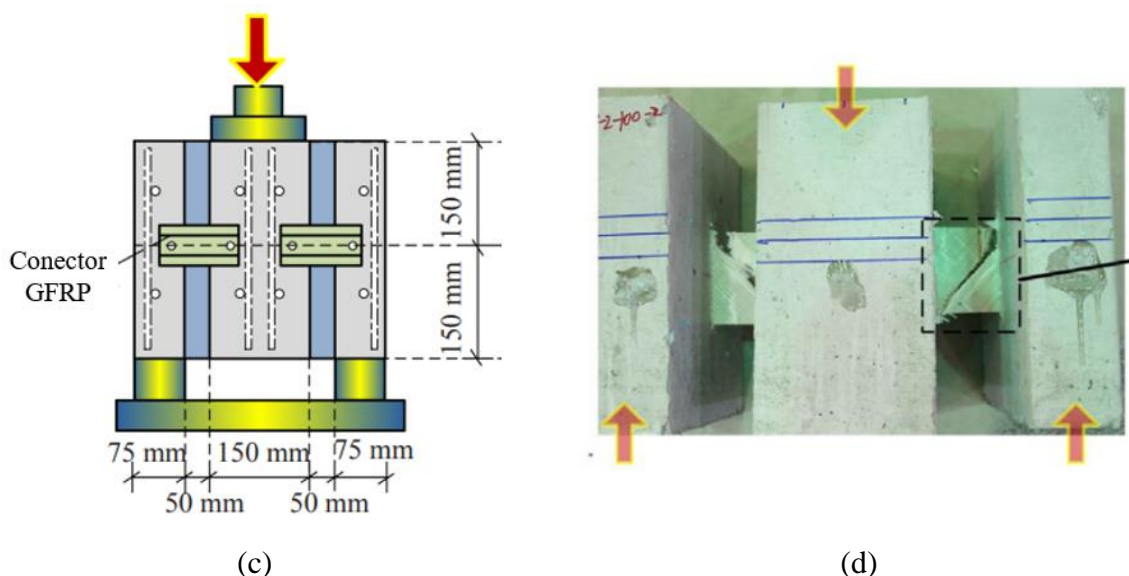


Figura 16 – Ensaio *push-out*: (a) configuração do ensaio; (b) conector GFRP; (c) dimensões do corpo de prova; (d) modo de ruptura do conector ensaio. Adaptado de Huang e Dai (2019).

Huang e Dai (2019) testaram 4 espécimes de concreto utilizando a chapa plana de PRFV e classificaram cada um deles conforme a configuração do conector aplicado. Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios *push-out*, onde “F” representa o tipo do conector (*flat plate*), “100” e “160” correspondem a qual dimensão foi aplicada na direção do cisalhamento e “2” e “4” dizem respeito à quantidade de camadas de fibra de vidro utilizada, sendo aproximadamente 1.3-1.5mm e 2.5-2.7mm, respectivamente.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios *push-out* realizados por Huang e Dai (2019).

Identificação	Força (kN)		Rigidez (kN/mm)		Deslocamento (mm)
	Média	CoV (%)	Média	CoV (%)	
F-100-2	15.80	10.50	15.10	6.30	1.05
F-100-4	35.90	6.10	19.00	20.50	1.89
F-160-2	30.40	12.40	28.10	13.50	1.08
F-160-4	66.40	0.50	40.80	6.00	1.64

Os resultados obtidos por Huang e Dai (2019) mostraram que o aumento da espessura do conector de 1.3-1.5mm para 2.5-2.7mm provocou um aumento de 2 vezes na força resistente, sendo linearmente proporcional a espessura. Mas para a rigidez, esse aumento foi somente de 1.4 vezes, que pode ser explicado pelo fato de que a maior quantidade de camadas de fibra vidro permite que a chapa polimérica absorva mais danos antes de alcançar a força máxima.

Quanto ao efeito da posição do conector em relação a atuação do cisalhamento, o aumento do comprimento em 1.6 vezes (de 100mm para 160mm) causou um acréscimo de aproximadamente 2 vezes tanto na força resistente quanto na rigidez. Além disso, os autores

relataram que o modo de falha dos conectores foi majoritariamente o cisalhamento longitudinal com ruptura das fibras tracionadas (ver Figura 16(d)).

Silva (2020) desenvolveu um trabalho experimental para avaliar o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento PerfoFRP para painel sanduíche. Para isso, o autor realizou ensaios *push-out* combinando conectores PerfoFRP reforçados com fibra de vidro similares aos de Lameiras (2015) e corpos de prova de concreto com a geometria proposta por Huang e Dai (2019), como mostra a Figura 17.

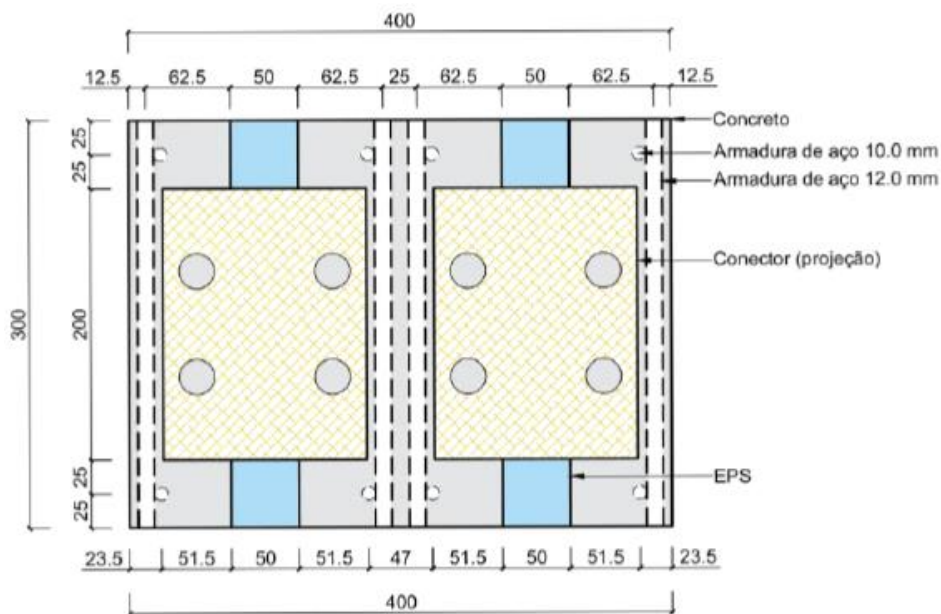


Figura 17 – Geometria do corpo de prova de concreto analisada por Silva (2020) (dimensões em mm).

Neste caso, as variáveis analisadas foram o diâmetro e espaçamento dos furos. Sendo adotados furos com 6.35mm, 12.70mm, 19.05mm, 25.40mm e 31.75mm de diâmetro, espaçados entre si 1.75, 2.00, 2.50 e 3.00 vezes o diâmetro do respectivo furo. Os espécimes foram identificados no formato “SP-X-Y”, onde SP é uma sigla atribuída a palavra espécime, X representa o diâmetro adotado para o furo, em milímetros, e Y corresponde ao espaçamento do furo, também em milímetros. Para fins de comparação, também foi realizado testes em um grupo de conectores sem furos, denominados CTL. Os resultados obtidos por Silva (2020) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos testes *push-out* realizados por Silva (2020).

Espécime	Força (kN)		Rigidez (kN/mm)		Deslocamento (mm)	
	Média	CoV (%)	Média	CoV (%)	Média	CoV (%)
SP-6.35-3.00	23.02	11.40	23.64	8.90	0.99	20.40
SP-12.70-1.75	32.23	5.70	26.38	19.00	1.28	24.50
SP-12.70-2.00	31.91	9.60	28.37	11.40	1.15	20.70
SP-12.70-2.50	30.35	0.90	35.93	53.20	1.17	52.60
SP-12.70-3.00	28.84	22.80	28.07	17.20	1.04	10.10
SP-19.05-2.00	25.99	7.10	11.67	6.20	2.23	0.90
SP-19.05-3.00	20.93	19.60	21.09	45.40	1.19	45.10
SP-25.40-1.75	24.50	5.80	30.15	49.80	1.01	39.40
SP-25.40-2.00	27.85	3.60	33.02	47.90	1.13	56.80
SP-25.40-3.00	23.94	20.10	19.09	23.90	1.39	44.20
SP-31.75-2.00	25.89	6.20	21.20	18.90	1.29	13.40
SP-31.75-3.00	26.51	5.50	32.71	42.40	0.94	32.20
SP-CTL	22.21	4.80	17.57	29.70	1.37	27.40

Além disso, como parte da análise da eficácia das conexões fabricadas, Silva (2020) incluiu no estudo um bloco de concreto sem conectores (SP-EPS). Esse bloco também foi submetido a um ensaio *push-out*, e a curva correspondente é exibida na Figura 18. Para esse ensaio em específico, o autor registrou uma carga máxima de cerca ( $Q_{lo}$ ) de 3.2kN, acompanhada por um deslocamento ( $S_{lo}$ ) muito próximo a 10 mm.

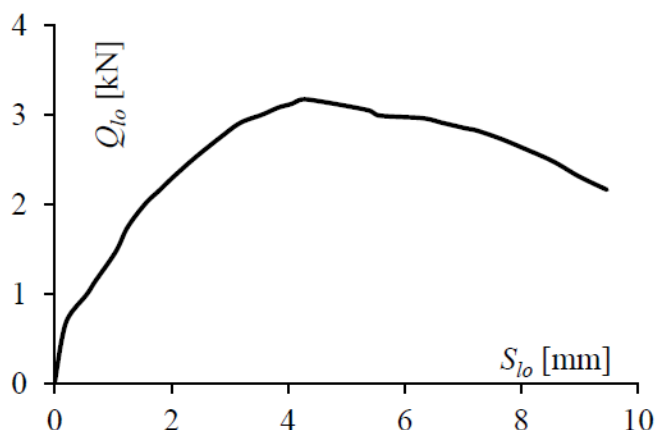


Figura 18 – Curva carregamento × deslocamento do bloco SP-EPS (SILVA, 2020).

Os demais resultados dos testes experimentais realizados por Silva (2020) apontaram que para todos os espaçamentos adotados, as conexões com furos de 12.70mm apresentaram os melhores desempenhos mecânicos. Para os furos menores, (6.35mm e 12.70mm) o aumento da resistência em relação ao grupo CTL variou de 4% a 45%, enquanto para os furos maiores (19.05mm, 25.40mm e 31.75mm) a variação foi de -6% a 25%. Por fim, as conexões do grupo

SP-6.35-3.00 demonstraram um incremento de apenas 4.65% na capacidade de carga em relação ao grupo de conectores sem furo, sendo considerado pouco relevante.

No geral, os ensaios *push-out* fornecem informações essenciais para o projeto e dimensionamento adequado dos conectores de cisalhamento em painéis sanduíche, possibilitando uma maior compreensão do seu comportamento estrutural e aprimorando a eficiência e segurança das estruturas. No entanto, é importante destacar que novas pesquisas e normativas específicas para esses ensaios são necessárias para um melhor entendimento e padronização dos resultados.

### 2.3. COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Compósitos poliméricos são a combinação de dois ou mais materiais, com diferentes tipos de reforços adicionados para melhorar o desempenho do produto final. Os compósitos poliméricos estão sendo cada vez mais utilizados no campo da engenharia, sendo o foco das pesquisas a caracterização do desempenho, durabilidade e confiabilidade para fins estruturais (SHOJAEI; KHASRAGHI, 2021).

A pesquisa de Hsissou *et al.* (2021) aponta que existem duas classes principais para esses materiais. Os compósitos de grande difusão são os mais comuns, geralmente, feitos de fibra de vidro e resina de poliéster e representam mais de 95% da produção. E os compósitos de alta performance, constituídos principalmente de resina epóxi reforçada com longas fibras de vidro ou carbono.

Como os materiais compósitos é um sistema formado por um número de constituintes relativamente grande, a possibilidade de combinações entre os materiais é praticamente infinita. Nesse sistema, os principais componentes da formulação são as matrizes, os aditivos e as fibras para reforço. Portanto, a natureza da matriz, o tipo de fibra e o processo de produção utilizado, tem um impacto decisivo nas propriedades do produto acabado (HSISSOU *et al.*, 2021).

As matrizes são consideradas o elo mais fraco na estrutura dos compósitos poliméricos e tem a finalidade de atribuir ao material resistência ao impacto e a ataques químicos, redução da absorção de água, delaminação e influência a altas temperaturas. Já a fibra é responsável por conferir resistência e rigidez aos compósitos. As fibras podem chegar a representar até 60% do volume do compósito polimérico, resultando em um material mais resistente quando tensionados na mesma direção das fibras e mais fracos quando solicitados perpendicular a posição das fibras (MALLICK, 2017).

A adesão efetiva entre a matriz e as fibras é essencial para garantir a transferência eficiente de carga e o desempenho mecânico adequado do compósito (Fan e Yu, 2008). Dessa

forma, estratégias como o uso de agentes de acoplamento e tratamentos de superfície têm sido amplamente estudadas para melhorar a interação entre a matriz e as fibras, resultando em um compósito mais resistente e durável (Kinloch, 2018).

Além disso, o processamento das matrizes poliméricas é uma área de pesquisa importante. Diferentes métodos de processamento, como moldagem por compressão, moldagem por injeção e moldagem por transferência de resina, são investigados quanto aos seus efeitos na qualidade e nas propriedades dos compósitos poliméricos. Para se obter materiais compósitos de alta qualidade, é necessário atentar-se para o ajuste dos parâmetros de processamento, como temperatura, pressão e tempo de cura (RAJAK *et al.*, 2019).

Quanto a aplicação dos compósitos poliméricos, Mallick (2017) considera que o uso desses materiais nas áreas comercial e industrial é tão variado que é impossível citar todos eles. Mas, o autor destaca as principais aplicações nas áreas estruturais, que inclui, aeronaves, automóveis, artigos esportivos e infraestrutura.

### **2.3.1. Matrizes poliméricas**

A função da matriz na composição do compósito polimérico é manter as fibras de reforço alinhadas à na posição correta, transferir a carga entre as fibras e protegê-las de possíveis ações degradantes (MALLICK, 2017). Apesar das propriedades mecânicas dos compósitos, especialmente a resistência a tensão longitudinal, dependerem majoritariamente do material de reforço, as propriedades de tensão transversal, compressão, cisalhamento e resistência ao calor possuem maior relação com a matriz. Além das matrizes influenciarem diretamente nas propriedades dos compósitos, a escolha dos parâmetros de processamento e o método de produção também são determinados conforme o processo de preparação da matriz (WANG *et al.*, 2011).

As matrizes poliméricas são divididas em três categorias: termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os elastômeros são definidos como polímeros capazes de fazer mudanças físicas e químicas à medida que ocorrem variações na temperatura, o que causa alterações em suas propriedades finais. A característica mais importante desse material é a capacidade de recuperação elástica quando submetidos a deformações mecânica pela aplicação de forças de tração ou compressão. A borracha é um elastômero composto por várias unidades de monômeros que consistem de polímeros curados termicamente para aumentar sua tenacidade e resiliência (RAMDANI, 2019).

Os termoplásticos possuem a capacidade de se tornar fluido ou plastificado repetidas vezes mediante a aplicação de uma energia térmica, sem grandes alterações em suas

propriedades, sendo exemplo desses materiais o polisulfeto de fenileno (PPS), polipropileno (PP), polieterimida (PEI) e poliamida (PA-6). Enquanto isso, os termofixos não conseguem alcançar um comportamento completamente fluido devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares, como exemplo temos o poliéster, epóxi, éster vinílico e poliuretanos. Tanto os polímeros termoplásticos quanto os termofixos são utilizados na produção de compósitos de alta performance. Porém, a indústria dos compósitos tem uma preferência pelos termofixos devido sua alta resistência, durabilidade, estabilidade térmica e química (RAMDANI, 2019). A Tabela 5 apresenta características de polímeros frequentemente utilizados na fabricação de materiais compósitos.

Tabela 5 – Propriedades de polímeros utilizados na produção de compósitos (MALLICK, 2017).

Polímero	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Termofixos			
Epóxi	1.2-1.3	55-130	2.75-4.1
Poliéster	1.1-1.4	35-104	2.1-3.5
Éster vinílico	1.12-1.32	73-81	3-3.5
Poliuretanos	1.21	30-40	0.7
Termoplásticos			
Polisulfeto de fenileno (PPS)	1.35	93	3.45
Polipropileno (PP)	0.90	36	1.5
Polieterimida (PEI)	1.28	117	3.45
Poliamida – 6 (PA-6)	1.13	80	3.10

Quanto a sua origem, as resinas podem ser sintéticas, semissintéticas ou naturais. As resinas naturais são obtidas diretamente de fontes animais, vegetais ou minerais. As semissintéticas são oriundas de produtos naturais que passaram por modificações químicas, como a resina poliuretana do óleo da mamona e o nitrato de celulose. Já as sintéticas são formadas através de reações de adição e condensação, como poliuretanos (PU), resina epóxi e o poli acetato de vinila (PVA) (MILANESE, 2008).

A resina epóxi é a mais utilizada na produção de compósitos de alta performance para aplicação nas áreas aeroespacial e em artigos esportivos. Os epóxios destacam-se entre os termofixos devido sua elevada capacidade de carga, excelente resistência a produtos químicos e solventes, alta performance quando submetidas a temperaturas elevadas e boa aderência a

uma variedade de fibras, o que favorece sua aplicação no campo estrutural. As principais desvantagens desses materiais é o custo relativamente alto e longo tempo de cura (MALLICK, 2017).

Já as resinas poliéster representam 85% a 95% do uso de matrizes termofixos (HSISSOU *et al.*, 2021), sendo sua aplicação mais comum na indústria automotiva, elétrica e para fins comerciais devido seu custo relativamente baixo e o equilíbrio nas propriedades química, mecânica e elétrica. Embora o poliéster possua viscosidade e propriedades mecânicas mais baixas do que o epóxi, eles são preferíveis para aplicações de produção em massa devido seu tempo de cura ser mais rápido (MALLICK, 2017).

As pesquisas tem buscado, por meio de ensaios experimentais, comparar as propriedades o desempenho mecânico de compósitos produzidos com as matrizes poliéster e epóxi, afim de compreender melhor suas características, identificar suas vantagens e limitações quando combinadas a diferentes materiais de reforço.

Temos como exemplo os seguintes trabalhos: Hemanth *et al.* (2017) que avaliaram as matrizes epóxi e poliéster reforçadas com fibra de coco e fibra de vidro; Neves *et al.* (2020) realizaram um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas de compósitos de base poliéster e epóxi reforçados com fibra de cânhamo; Cavalcanti *et al.* (2020) realizaram uma análise comparativa das propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de matriz poliéster e epóxi reforçado com fibras naturais nas seguintes combinações: juta pura, juta + curauá e juta + sisal. A tabela 6 apresenta as propriedades de tensão dos compósitos obtidas nas pesquisas descritas.

Tabela 6 – Propriedades de tensão de compósitos de base epóxi e poliéster.

Tipo de reforço	Resistência à tração (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)		Referências
	Epóxi	Poliéster	Epóxi	Poliéster	
Fibra de coco	17.43	14.80	1.58	0.99	Hemanth <i>et al.</i> (2017)
Fibra de vidro	40.53	28.87	3.12	2.41	
Fibra de cânhamo	50.46	31.46	1.72	0.51	Neves <i>et al.</i> (2020)
Juta	39.75	38.62	3.44	5.59	Cavalcanti <i>et al.</i> (2020)
Juta + Curauá	70.39	52.25	5.44	5.90	
Juta + Sisal	74.78	46.82	6.76	5.03	



Com base nos resultados, Hemanth *et al.* (2017) relataram que todos os compósitos apresentaram um comportamento frágil, pois o rompimento ocorreu de forma abrupta ao atingirem o carregamento máximo, sem nenhuma evidência da perda de resistência. Além disso, para ambas as fibras de reforço (coco e vidro) os compósitos de resina epóxi alcançaram maiores capacidade de carga comparado aos compósitos de poliéster. Os autores concluíram que os resultados obtidos para os compósitos reforçados com fibra de coco não podem ser ignorados, pois mesmo com limitações em sua resistência, o material tem potencial para aplicações que requerem boa rigidez.

Neves *et al.* (2020) mostraram que para o comportamento a flexão, a fibra de cânhamo revelou ser um reforço bastante eficaz para o compósito de base epóxi, pois o uso de 30% em volume da fibra gerou um aumento de 90% na resistência à flexão (76.69MPa), comparado com a matriz sem reforço (40.30MPa). Por outro lado, a implementação dos 30% em volume da fibra de cânhamo no compósito de matriz poliéster não gerou melhorias significativas entre a matriz pura (50.31MPa) e o compósito reforçado (49.09MPa). Já no comportamento a tração, o uso da fibra de cânhamo resultou em ganhos superiores a 30% da resistência para ambas as resinas, indo de 38.11MPa para 50.46MPa no compósito com resina epóxi e de 23.19MPa para 31.46MPa no compósito com resina poliéster.

Cavalcanti *et al.* (2020) concluíram que para ambas as matrizes, o reforço híbrido melhorou as propriedades dos compósitos em relação ao reforço isolado de juta. Os compósitos a base de resina epóxi apresentaram maior resistência à tração e também maior estabilidade térmica, enquanto os compósitos com matriz poliéster mostraram maior rigidez a tração e flexão, se destacando no quesito resistência ao impacto. Com isso, os resultados sugerem que a escolha da matriz depende das exigências específicas da aplicação e do desempenho mecânico desejado.

Para selecionar a matriz polimérica adequada, temos que considerar não apenas as propriedades mecânicas, mas também fatores os fatores específicos da aplicação, disponibilidade de materiais, viabilidade econômica e condições ambientais. Por isso, além das matrizes epóxi e poliéster, a produção de materiais compósitos também busca empregar resinas de origem natural, que oferecem vantagens ambientais e propriedades específicas.

#### 2.3.1.1. Resina poliuretana derivada do óleo da mamona

As resinas oriundas de produtos naturais são uma alternativa sustentável aos polímeros sintéticos tradicionais, oferecendo menor impacto ambiental, boa resistência mecânica e baixa

densidade. Quando essas resinas são obtidas de fontes renováveis, elas tornam-se ainda mais atrativas para aplicações que visam reduzir a pegada de carbono e fornecer produtos ecológicos.

O óleo vegetal é a matéria-prima de base biológica mais adequada para produção de polímeros. Esses óleos não só possuem cadeias longas de ácidos graxos ramificados intrinsecamente, mas também contém duplas ligações insaturadas, fornecendo um local de reação para epoxidação. Entre os óleos vegetais, o óleo da mamona, óleo de soja e o óleo de linhaça são os mais interessantes e utilizados com mais frequência (LIU *et al.*, 2021).

O óleo de mamona é extraído da semente da planta *Ricinus communis*, pertencente à família euphorbiaceae, possui boa resistência a ácidos e álcalis e forte adaptabilidade. É um óleo viscoso, amarelado, não volátil, não irritante e não secante, com um sabor suave, sendo algumas vezes usado como laxante (MA *et al.*, 2022). Em contrapartida, as sementes da mamona são venenosas para humanos e animais, pois contém ricina e alérgenos tóxicos. A ingestão acidental dessas sementes pode desencadear uma série de reações, como dores abdominais, vômito e diarreia, sendo que a ingestão de uma quantidade mínima de 1mg de ricina é suficiente para ser letal a um adulto (OGUNNIYI, 2006).

A planta de mamona é encontrada em países tropicais e subtropicais, ela se desenvolve em grandes quantidades e em ambientes de baixa umidade, com temperaturas entre 20°C e 26°C. Atualmente, seus maiores produtores são Índia, China e Brasil, sendo responsáveis por aproximadamente 94% da produção no ano de 2010. No Brasil, a plantação da mamona se concentra na região Nordeste, que atinge anualmente uma produtividade média de 602kg/ha (OGUNNIYI, 2006; BARROS; RAMOS, 2022).

As plantas dessas espécies apresentam características muito variadas (Figura 19), podendo ser encontrados tipos com folhas e caule verde, vermelho ou rosa, frutos com ou sem espinho, com sementes de diversos tamanhos, coloração e diferentes teor de óleo (MILANI, 2022). Mas, em média, cada semente contém cerca de 46% a 55% de óleo, em peso. A produção global de sementes é estimada em um milhão de toneladas, enquanto que o óleo extraído alcança o valor de 500.000 toneladas, anualmente (OGUNNIYI, 2006; MA *et al.*, 2022).

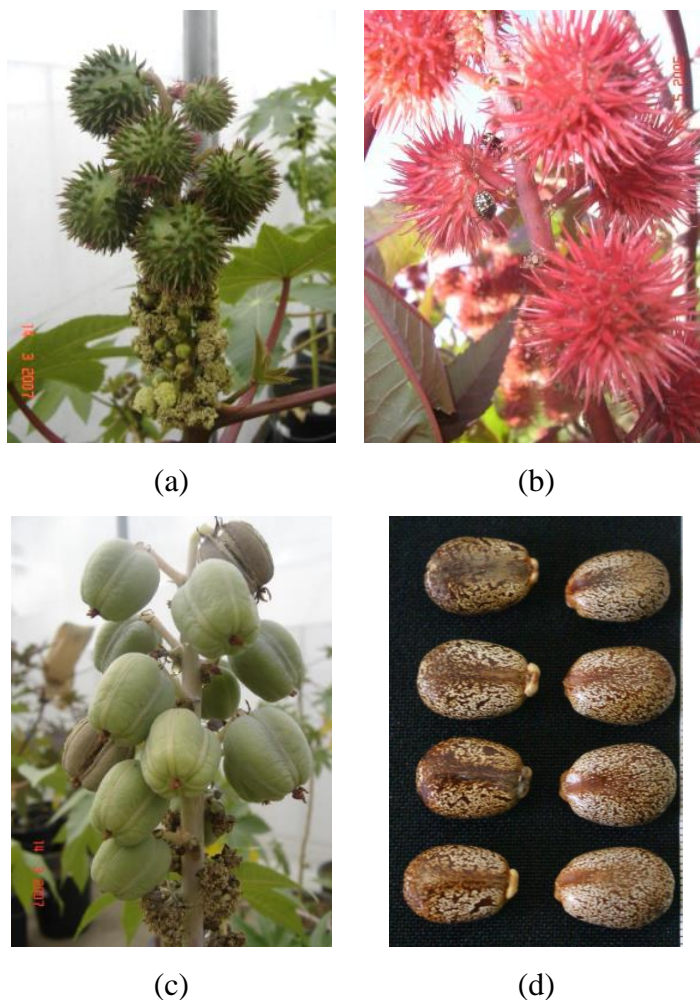


Figura 19 – Características da planta de mamona: (a) fruto verde com espinhos; (b) fruto vermelho com espinhos; (c) fruto verde sem espinhos; (d) sementes. (MILANI, 2022).

Da mesma forma que outros óleos vegetais, as propriedades físicas e químicas do óleo da mamona variam de acordo com o método de extração (OGUNNIYI, 2006). Sendo umas das poucas fontes naturais que se aproxima de um composto puro, o óleo da mamona possui quase 90% de ácido ricinoleico em sua composição, que confere ao óleo propriedades únicas e versatilidade incomuns devido à presença de grupos de hidroxilas e ligação dupla (SILVESTRE FILHO, 2001). A Tabela 7 apresenta a composição do óleo da mamona.

Tabela 7 – Composição do óleo da mamona (OGUNNIYI, 2006).

Componentes	Concentração (%)
Ácido ricinoleico	89
Ácido linoleico	4.2
Ácido oleico	3.0
Ácido esteárico	1.0
Ácido palmítico	1.0
Ácido dihidroxiesteárico	0.7
Ácido linolênico	0.3
Ácido eicosanóico	0.3

Dentre os vários polímeros derivados do óleo da mamona, os poliuretanos (PU) são os mais comuns, podendo as reações químicas resultarem em polímeros termoplásticos ou termofixos. A síntese do polímero PU ocorre entre grupos de hidroxilas (polióis) e isocianetos, formando ligações de uretano (CHAKRABORTY; CHATTERJEE, 2020). A reação é exotérmica e sua velocidade depende da estrutura do isocianato e também do poliol. O poliuretano obtido, geralmente, se apresenta na forma bicomponente, constituído de um pré-polímero e do poliol extraído da mamona (SILVESTRE FILHO, 2001).

Silvestre Filho (2001) acredita que apesar do desenvolvimento relativamente recente dos poliuretanos em comparação com outros polímeros, sua notável capacidade de gerar materiais com propriedades diversas os elevou à posição de um dos principais polímeros do século. Tanto que o poliuretano derivado do óleo da mamona tem sido objeto de diversas pesquisas que buscam avaliar sua aplicabilidade em materiais compósitos, até mesmo como uma alternativa sustentável aos polímeros sintéticos.

Milanese (2008), por exemplo, analisou as propriedades térmica e mecânica de compósitos de matriz poliuretana do óleo da mamona reforçado com fibra de sisal e fibra de vidro para aplicar como reforço em estruturas de madeira. Os resultados da termografia utilizada para análise térmica dos materiais mostraram que a resina poliuretana da mamona pura e o compósito com fibra de vidro atingem o ponto inicial de degradação à 220°C, enquanto o compósito com fibra de sisal inicia a degradação a 175°C. Assim, adição da fibra de vidro manteve a estabilidade térmica do material, ao passo que, a adição da fibra de sisal reduziu essa estabilidade.

Quanto as propriedades mecânicas, foram obtidos valores de resistências de tração e flexão para a resina de mamona pura de 2.5MPa e 4.5MPa, respectivamente. Os resultados

mostraram que a resistência a tração dos compósitos aumentou para 16.9MPa com o reforço de sisal e 95.4MPa com reforço de fibra de vidro. No comportamento a flexão só houve ganho de resistência para o compósito de fibra de vidro que atingiu 14.2MPa, enquanto que no compósito com fibra de sisal o valor caiu para 3.7MPa. Assim, Milanese (2008) concluiu que é viável a utilização dos compósitos analisados como reforço em estruturas de madeira, pois as resistências obtidas são adequadas a essa aplicação.

Sousa (2013) realizou uma caracterização do comportamento a tração de compósitos com resina à base de mamona reforçado com as fibras de rami, sisal e bucha vegetal visando aplicação desses materiais na construção civil. Para isso, foram produzidos compósitos através de moldagem por compressão a temperatura ambiente, utilizando teores de 25%, 35%, 45% e 55% de fibra, dispostas alinhadas ou aleatoriamente. Para fins de comparação, também foram realizados testes de tração na matriz poliuretana a base de mamona, resultando em uma resistência de 9.99MPa, módulo de elasticidade de 0.58GPa e deformação máxima de 6.30%. A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de tração para os materiais estudados analisados.

Tabela 8 – Resumo das propriedades dos compósitos estudados por Sousa (2013).

Material de reforço	Orientação	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Sisal	Alinhada	96.11 – 147.55	15.39 – 22.19	3.18 – 5.60
	Aleatório	11.10 – 33.65	5.62 – 7.27	0.32 – 2.25
Rami	Alinhada	43.43 – 92.36	18.84 – 22.56	0.33 – 3.66
	Aleatório	25.20 – 50.51	4.49 – 14.69	0.32 – 2.90
Bucha vegetal	Aleatório	22.85 – 25.21	2.87 – 4.74	1.87 – 4.56

Com base nos resultados, Sousa (2013) concluiu que tanto para o sisal quanto para a rami, os compósitos com fibra alinhada apresentaram os melhores desempenhos mecânicos, fornecendo resistência a tração superiores aos compósitos com fibras aleatórias. No compósito reforçado com fibra de sisal alinhada, que apresentou a maior resistência a tração, a adição da fibra implicou em um ganho de resistência entre 870%-1390% quando comparado com a resistência da matriz poliuretana de mamona pura. Os compósitos com fibras aleatórias as propriedades mecânicas analisadas não apresentaram alterações significativas.

Mais recentemente, Faria *et al.* (2020) analisaram compósitos com a matriz de mamona reforçada com fibras da casca de coco. Os compósitos foram produzidos em frações volumétricas de 30, 50, 65 e 75% de fibras através da moldagem por compressão a temperatura ambiente. Neste caso, foram investigadas a capacidade de absorção de água, densidade aparente e resistência a tração dos compósitos.

Faria *et al.* (2020) relataram que o reforço das fibras da casca de coco não teve impacto significativo na absorção de água, densidade aparente e módulo de elasticidade dos compósitos. Como as fibras não foram tratadas, os altos níveis de extrativos e lignina garantiram a estabilidade da absorção de água à medida que a resina foi sendo substituída pelas fibras. Para a densidade aparente foram obtidos valores constantes em todas as proporções analisadas, caracterizando os compósitos como homogêneos. Já a resistência a tração aumentou 28.47%, atingindo valores de 4.39MPa a 5.64 MPa nos compósitos com 30% e 75% de fibras, respectivamente. Os autores concluíram que o material obtido possui propriedades mecânicas similares às de materiais tradicionais e pode ser viável para aplicação na indústria automotiva e na construção civil.

Em suma, as pesquisas demonstram que a resina poliuretana do óleo da mamona é adequada para aplicação em compósitos reforçado com fibra sintética e principalmente fibras naturais. A matriz da mamona apresentou propriedades mecânicas satisfatórias para aplicação na construção civil, sendo uma alternativa renovável para substituir os polímeros sintéticos convencionais.

Temos também que, tanto as matrizes sintéticas quanto as derivadas de produtos naturais possuem suas vantagens e desafios específicos. As investigações em torno desses materiais buscam comparar suas propriedades, desempenho e compatibilidade com as fibras de reforço, contribuindo para o desenvolvimento de compósitos poliméricos adequados às necessidades específicas de aplicação, que levam em consideração tanto os requisitos de desempenho quanto as questões ambientais. Assim, é importante continuar explorando diferentes formulações e processos de produção para maximizar o potencial de aplicação desses materiais.

### **2.3.2. Reforço com fibra sintética**

Na composição dos compósitos poliméricos, a fibra é o principal componente de suporte de carga, pois sua resistência e rigidez são muito maiores que as do material da matriz (RAHMAN; PUTRA, 2019). Quando feitas com produtos químicos, as fibras são chamadas de sintéticas, sendo as mais comuns as fibras de vidro, carbono, basalto e aramida (Figura 20) (SATHISHKUMAR *et al.*, 2014).

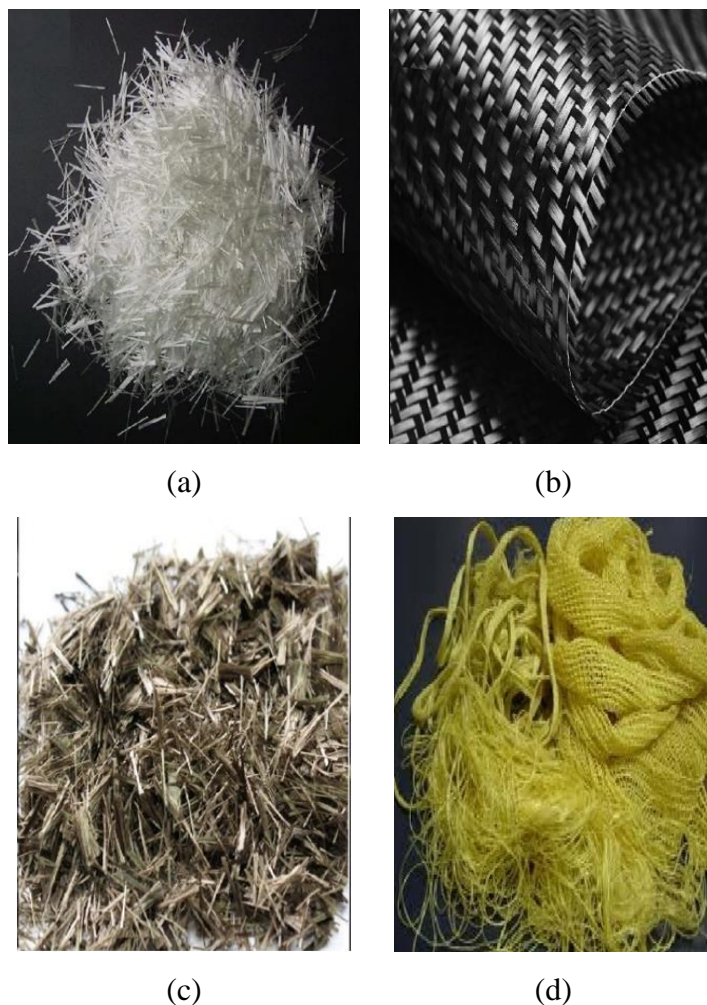


Figura 20 – Fibras sintéticas de: (a) vidro, (b) carbono, (c) basalto e (d) aramida.

A fibra de vidro é a mais utilizada como reforço de compósitos poliméricos. É uma fibra de baixo custo e que oferece alta resistência, boa durabilidade e isolamento térmico. Mas, ela também é altamente abrasiva, o que reduz a sua resistência usual (AGARWAL *et al.*, 2017). Por isso, Mallick (2017) aconselha que os polímeros reforçados com fibras de vidro sejam cortados ou usinados com fresas de carboneto ou com pontas de diamante. Outra solução apontada pelo autor para diminuir a ação abrasiva é o uso de lubrificantes, que além de proteger os filamentos, também promove melhor conexão entre as fibras e a matriz polimérica.

Quando a aplicação final requer maior rigidez e resistência, predomina-se o emprego das fibras de carbono (RAJAK *et al.*, 2019). Segundo os autores, na fabricação de compósitos poliméricos o aumento da porcentagem em peso das fibras de carbono de 10% para 30% proporciona um aumento do Módulo de elasticidade e do isolamento em 78% e 113%, respectivamente. Mallick (2017) menciona que, mesmo sendo mais caras que as fibras de vidro, as fibras de carbono se tornam mais atraentes devido apresentarem menor densidade e maior módulo de resistência a tração.

Já as fibras de basalto surgiram na área da engenharia civil como uma alternativa promissora, uma vez que possuem maior rigidez e resistência a corrosão que as fibras de vidro e são mais baratas que as fibras de carbono (DIAB; WU, 2007). A substituição das fibras de vidro por fibras de basalto pode reduzir os riscos de poluição do ambiente por metais altamente tóxicos e óxidos, além de serem uma alternativa para as fibras de asbestos, banidas do mercado por serem cancerígenas (LAPENA; MARINUCCI, 2017). Mesmo com toda visibilidade, Dhand *et al.* (2015) defendem a necessidade de revisão e desenvolvimento de pesquisas mais detalhadas sobre as propriedades e aplicação das fibras de basalto, principalmente no campo da biologia para fabricação de materiais compósitos biodegradáveis.

Segundo Agarwal *et al.* (2017), as fibras de aramida possuem propriedades únicas e que podem ser modificadas com o uso de aditivos, variando a disposição dos fios ou com tratamentos térmicos. Os autores relatam que a resistência a tração e ao impacto são maiores e o alongamento da fibra é significativamente menor para a aramida do que qualquer outra fibra. Porém, Malick (2017) explica que a resistência a compressão das fibras de aramida é muito baixa, por isso elas não são selecionadas para aplicações que envolvem tensões de compressão. Além disso, elas são termicamente instáveis quando submetidas a temperaturas acima de 160°C, tendem a absorver umidade e podem ter suas propriedades afetadas por longas exposições a luz do sol.

Cheng *et al.* (2018) aponta que as fibras de aramida possuem superfície inerte, o que representa um problema na ligação entre as fibras e a matriz. Segundo os autores, essa adesão desempenha um papel importante nos compósitos, pois assim ocorre a transferência de tensões da matriz para a fibra, que é parte mais resistente do material. Isso faz com que os polímeros reforçados com fibras de aramida apresentem um desempenho diferente do esperado.

Uma comparação de algumas propriedades mecânicas das fibras sintéticas é apresentada na Tabela 9. Ainda que os valores sejam semelhantes, é possível observar que a fibra de basalto possui a melhor resistência a tração, seguida pela fibra de carbono que, em contrapartida, detém o menor alongamento. As fibras de carbono e aramida apresentam maiores Módulo de elasticidade e, conseqüentemente, os menores alongamento. A fibra de vidro, considerada a mais utilizada, oferece a menor força de tração e o maior índice de alongamento dentre todas as fibras.



Tabela 9 - Propriedades das fibras sintéticas. Adaptado de Gangil *et al.* (2020).

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro (µm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Vidro	2.50	0.55-0.77	3300	70
Carbono	1.75	5-10	3790	230
Basalto	2.56-2.80	13-18	4200	98
Aramida	1.44	12	3620	124

Embora os materiais poliméricos reforçados com fibras sintéticas ofereçam melhores condições de resistência e baixo peso quando comparados com outros materiais de construção, a tendência é que haja uma redução em sua aplicação. Isso ocorre principalmente devido aos altos custos e grandes quantidades de energia exigidos na produção, além dos elevados índices de poluição gerados na fabricação e reciclagem desses materiais (GIRISHA *et al.*, 2012).

### 2.3.3. Reforço com fibra natural

As fibras naturais são um material renovável, facilmente obtido e amplamente disponível na natureza (RAJAK *et al.*, 2019). Elas são classificadas na literatura de acordo com a sua origem, podendo ser derivada de um vegetal, animal ou mineral (Figura 21). Os exemplos mais comuns incluem o algodão, linho, cânhamo, sisal, juta e coco (CHAND; FAHIM, 2021).

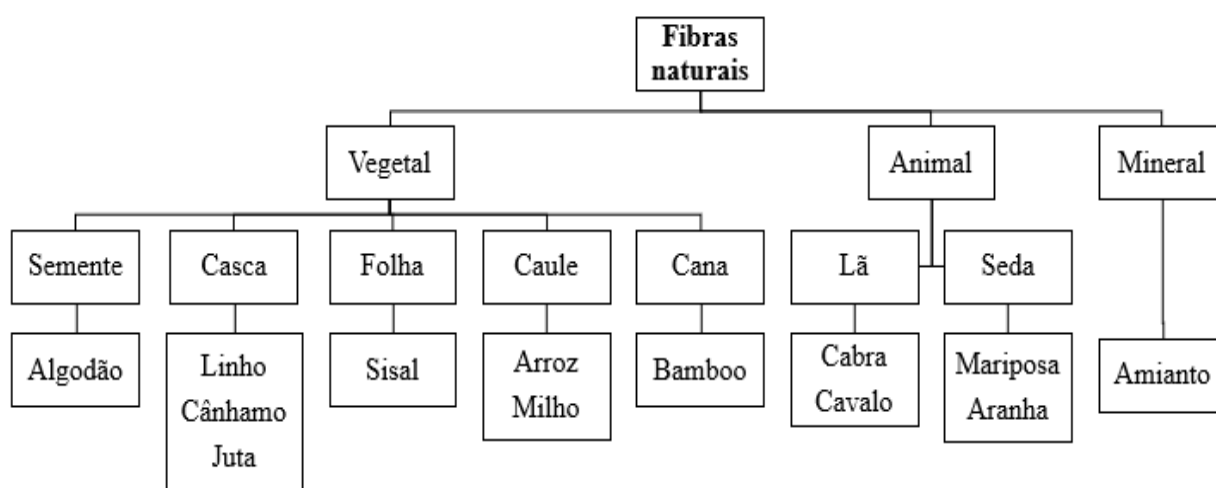


Figura 21 – Classificação das fibras naturais. Adaptado de Sanjay *et al.* (2018).

De acordo com Agarwal *et al.* (2017), tem surgido um interesse crescente nas pesquisas e no uso das fibras naturais como reforço de compósitos nos últimos anos. Para Pickering *et al.* (2016), isso ocorre por diversas razões, dentre elas a possibilidade de substituir a fibras sintéticas por uma fibra natural que permite a redução de custos, peso, poluição e toxicidade, além de ser biodegradável e reciclável. Nair e Joseph (2014) entendem que essas vantagens criam um perfil competitivo para os compósitos de fibra natural e os colocam na classe de materiais de alta performance, sendo capaz de oferecer benefícios econômicos e ambientais ao mesmo tempo.

Para Gangil *et al.* (2020), as propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais não são tão atraentes como as fibras sintéticas, mas eles acreditam ser possível fazer essa substituição em algumas áreas de aplicação dos compósitos poliméricos. Os pesquisadores ainda apresentam algumas propriedades mecânicas para as fibras naturais mais comuns (Tabela 10).

A partir dos dados da Tabela 10, é possível observar que algumas fibras, como o linho e o cânhamo, possuem módulo de elasticidade da mesma ordem que o material sintético (Tabela 9). Porém, a resistência a tração das fibras naturais é baixa comparada com as fibras sintéticas, sendo esse um dos fatores apontados por Westman *et al.* (2010) como limitador da produção em larga escala de compósitos poliméricos com fibras naturais. Os autores explicam que a baixa resistência é o resultado da incompatibilidade das fibras com a matriz, e que essa falta de adesão se torna um desafio durante a produção em escala.

O segundo fator é a capacidade de absorção de água das fibras. Essa absorção deforma a superfície do compósito, causando inchamento e deixando vários vazios. As deformações, por sua vez, provocam uma redução na resistência e um aumento no peso do material. Ou seja, com uma taxa de absorção superior a 20%, a vantagem de possuir baixo peso muitas vezes é anulada.

Tabela 10 - Propriedades das fibras naturais. Adaptado de Gangil *et al.* (2020).

Fibra	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Diâmetro (µm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Algodão	1.5-1.6	11-22	287-800	5.5-13
Linho	1.5	12-16	345-1830	27-80
Cânhamo	1.4-1.5	16-50	550-1110	58-70
Sisal	1.33-1.5	200-400	507-855	9.4-28
Juta	1.3-1.5	17-20	393-800	10-55
Coco	1.15-1.46	10-460	131-200	4-6
Curauá	1.3-1.5	40-320	500-1150	63.7

Em resumo, o uso de fibras naturais em compósitos poliméricos ainda enfrenta muitos desafios, como baixa durabilidade, baixa resistência ao impacto, grandes alterações nas propriedades e excesso de absorção de água, limitando as opções de matriz. Além disso, existem aspectos pouco explorados, como resistência elétrica, condutividade térmica e as propriedades de isolamento acústico (SANJAY *et al.*, 2018).

#### 2.3.3.1. Fibra de curauá

O curauá é uma planta amazônica, encontrada no norte do Brasil e em outros países da América do Sul, como Guiana, Colômbia, Venezuela e Suriname. A planta é uma espécie de bromélia, chamada *ananás erectifolius*, que na natureza assume duas formas mais comuns: folhas roxo-avermelhadas ou folhas verdes (AZEVEDO *et al.*, 2020). A figura 22 apresenta a aparência típica do curauá e sua fibra.



Figura 22 – Aparência do curauá: (a) folhas verdes; (b) folhas roxo-avermelhadas (SILVA, 2011).

Além da diferença na coloração das folhas, o curauá de folhas verdes possui fibras mais resistentes e macias, produzindo cerca de 6 rebentos por plantas, enquanto que o curauá com folhas roxo-avermelhada apresenta apenas 3 rebentos por planta e, conseqüentemente, um porte mais desenvolvido (SILVA, 2011). Normalmente, as folhas do curauá são duras, planas e eretas. Elas têm aproximadamente 1.5m de comprimento, 40mm de largura e 5mm de espessura e pesam cerca de 100g, rendendo de 7 a 10% de fibra seca (SOLTAN *et al.*, 2017).

O processo de obtenção da fibra de curauá é dividido nas seguintes etapas: plantio, colheita, desfibramento, lavagem, secagem e enfardamento (Figura 23). No plantio, a prática mais comum para preparação do solo é a queima, sem realização de análise ou adubação. Depois, é feita a marcação das linhas de plantio atendendo um espaçamento de 1m × 0.40m, resultando em 25.000 plantas por hectare. Após um ano do plantio, é realizada a primeira

colheita do curauá, podendo ser extraída uma quantidade de 48 folhas por planta, o que corresponde a aproximadamente 3kg de folha (SILVA, 2011; SENA, 2023).

Feita a colheita, as fibras passam pelo desfibramento, que consiste em um processo mecânico para separar a mucilagem (polpa) das fibras. Esse processo deve ser realizado logo após a colheita das fibras, no mais tardar, no dia seguinte (SENA, 2023). Depois, as fibras passam pelo processo de lavagem para retirar os resíduos da mucilagem e adquirir maciez, e então são colocadas em varais, por 2 ou 3 dias, para secagem. Por fim, são preparados os fardos com as fibras. Essa é uma atividade que apesar de ser relativamente simples, requer um maior número de mão de obra para organizar grandes quantidades de fibra em pequenos volumes sem o auxílio de prensas (SILVA, 2011).



Figura 23 – Processo de produção da fibra de curauá (SILVA, 2011).

Quanto ao armazenamento, não há recomendações específicas, apenas recomenda-se fazer o estoque do material em locais secos e ventilados afim de evitar a absorção de umidade (SILVA, 2011). A comercialização da fibra de curauá acontece diretamente entre a associação de produtores e a indústria, garantindo maior autonomia no preço final do produto. Também existe a comercialização das mudas, que se tornou mais lucrativa de que a produção das fibras, mas não há um mercado estável e estruturado para essa prática (SENA, 2023).

Soltan *et al.* (2017) relatam que as condições de cultivo e de colheita podem interferir diretamente na composição química das fibras. Neta *et al.* (2015) realizaram uma análise química para determinar os componentes presentes na fibra de curauá (Tabela 11) e concluíram que os valores obtidos são semelhantes aos dados encontrados na literatura. Os autores destacaram que o alto teor de celulose obtido implica em boas condições de resistência e rigidez para a fibra. Por outro lado, os valores de extrativos (ácidos graxos e ceras), lignina e cinzas encontrados na fibra podem afetar a ligação fibra-matriz e reduzir as propriedades mecânicas do compósito.

Tabela 11 – Composição da fibra de curauá (NETA *et al.*, 2015).

Componente	Quantidade (%)
Extrativos	17.30 ± 2.70
Celulose	71.03 ± 0.89
Lignina	9.53 ± 1.01
Cinzas	1.86 ± 0.12

Embora a fibra de curauá ofereça propriedades vantajosas, por se tratar de um material de origem vegetal, é essencial realizar o tratamento adequado das fibras para otimizar suas características, aplicabilidade e garantir a compatibilidade com matrizes poliméricas. Como as fibras de origem vegetal são hidrofílicas e possuem alta capacidade de absorção de umidade, é comum que haja fracas interações com as matrizes poliméricas, que são hidrofóbicas. Essa baixa compatibilidade dificulta a transferência de esforços da matriz para a fibra, comprometendo diretamente as propriedades mecânicas e físicas do compósito (NETA *et al.*, 2015). Além disso, a presença de água na fibra natural pode causar o desenvolvimento de fungos e bactérias, que pode levar a bio corrosão, ou alterar o volume da fibra, causando fraturas no material compósito (KICK *et al.*, 2017).

Existem muitos tipos de tratamentos disponíveis para realizar modificações superficiais nas fibras vegetais, sendo que, a alcalinização, acetilação, tratamento com silano, benzoilação, tratamento com isocianato, irradiação gama e tratamento com água do mar são os métodos mais conhecidos. Dentre esses tratamentos, a alcalinização é o método mais econômico e eficiente para separar fios individuais dos feixes de fibra, reduzir a absorção de umidade e reduzir a quantidade de componentes amorfos e lignina, resultando na melhoria das propriedades dos materiais compósitos (SENTHAMARAIKANNAN; KATHIRESAN, 2018).

A alcalinização ou tratamento alcalino é um tratamento químico, normalmente realizado pela mistura de água destilada e hidróxido de sódio (NaOH) em diferentes proporções. Pesquisas recentes buscam avaliar o efeito do tratamento alcalino nas propriedades mecânicas e térmicas de compósitos reforçados com fibra de curauá.

Por exemplo, Beltrami *et al.* (2014) avaliou o efeito do tratamento alcalino com NaOH em compósitos com o polímero poli (hidroxibutirato co-hidroxivalerato) (PHBV) reforçado com fibra de curauá. Para isso os autores variaram a concentração de NaOH em 1%, 5% e 10% e as fibras foram imersas na solução a 50° por 2 horas. Os resultados de Beltrami *et al.* (2014) mostraram que as fibras tratadas com 1% de NaOH não promoveu melhorias nas propriedades dos compósitos, enquanto que o tratamento com 10% de NaOH fragilizou as fibras, provocando uma queda na resistência dos compósitos.

Já as fibras tratadas com 5% de NaOH provocaram um aumento de 3% na resistência à tração, 24% no módulo de elasticidade, 30% na resistência à flexão e 12% na resistência ao impacto, comparados com compósitos produzidos com fibras sem tratamento. Além disso, constatou-se que a alcalinização reduziu a estabilidade térmica das fibras de curauá e, conseqüentemente, dos compósitos, indicando que a modificação química converteu parcialmente a celulose (BELTRAMI *et al.*, 2014).

Teixeira *et al.* (2020) analisou a influência do tratamento alcalino nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçado com curauá. Neste caso, as fibras também foram tratadas com uma proporção de 5% de NaOH, mas ficaram imersas na solução a 45°C por 6 horas, sendo agitadas manualmente. O primeiro ponto observado na aplicação do tratamento foi a remoção dos componentes amorfos, causando a desfibrilação das fibras e aumentando sua área superficial, que por sua vez, irá melhorar a interação entre a fibra e a matriz. Em contrapartida, o tratamento não se mostrou eficaz na redução da lignina, pois as fibras tratadas (6.81%) tinham uma quantidade de lignina semelhante as fibras não tratadas (6.83%).

Da mesma forma que relatado por Beltrami *et al.* (2014), Teixeira *et al.* (2020) notaram que as fibras tratadas possuem estabilidade térmica inferior as fibras não tratadas. E quanto as propriedades mecânicas dos compósitos, os resultados mostraram que o uso das fibras tratadas

aumentou a resistência a tração em apenas 7.69%, enquanto a resistência ao impacto aumentou cerca de 21%, comparados aos compósitos produzidos com fibras não tratadas.

Contudo, o curauá é considerado uma fibra promissora, pois possuem uma combinação adequada de boas propriedades materiais e baixo preço, além de alcançarem valores de resistência a tensão e flexão superiores às fibras de coco, sisal e juta (ver Tabela 10), atingindo um desempenho mecânico próximo às fibras de vidro (NAIR; JOSEPH, 2014). Devido suas propriedades de maciez e resistência, as fibras de curauá são empregadas como matéria prima em indústrias têxteis, automotiva, na fabricação de sacos, fios, escovas e bolsas (SILVA; AQUINO, 2008).

De acordo com Sena (2023), a empresa GE Plastics e a Unicamp desenvolveram um novo plástico denominado “nylon 6” reforçado com a fibra de curauá. Esse é o primeiro produto da GE Plastics que utiliza matéria prima de fonte renovável e a expectativa é que ao chegar ao mercado ele concorra com o nylon 6 reforçado com fibra de vidro, comumente utilizado na fabricação de peças automotivas e em eletrônicos.

Sena (2023) ainda destaca que os motivos que levaram a GE Plastics escolher primeiro o nylon 6 para receber o reforço de curauá foram: a possibilidade de inserir no mercado um novo compósito que pode substituir a fibra de vidro em várias aplicações e porque a produção do material compósito ocorre a uma temperatura que não causa degradação da fibra vegetal.

A semelhança entre os compósitos de curauá e fibra de vidro foi investigada por Maciel *et al.* (2018) através de uma análise comparativa da resistência à tração de compósitos de resina epóxi reforçados com fibra de curauá e fibra de vidro. Para isso, foram fabricados corpos de prova com diferentes proporções de fibra, incluindo 0% de fibra, 30% de fibra de curauá e 30% de fibra de vidro.

No ensaio de tração, os valores de resistência obtidos foram de 34.31 MPa para o compósito sem fibra, 54.79 MPa para o compósito com 30% de fibra de curauá e 71.91 MPa para o compósito com 30% de fibra de vidro. No entanto, ao considerar a resistência específica, que é a relação entre a resistência e a densidade, os valores encontrados foram de  $141.65 \text{MPa} \times \text{cm}^3/\text{g}$  para o compósito com fibra de curauá e  $64.53 \text{MPa} \times \text{cm}^3/\text{g}$  para o compósito com fibra de vidro. Assim, Maciel *et al.* (2018) concluíram que o compósito de epóxi reforçado com fibra de vidro é de fato mais resistente, porém, o compósito de epóxi com fibra de curauá apresenta melhores resultados na relação resistência/densidade.

Nesse contexto, outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de comprovar o potencial do uso das fibras de curauá em compósitos poliméricos e seu emprego nas mais diversas áreas da engenharia. Por exemplo, Teixeira *et al.* (2019) avaliaram o comportamento mecânico de compósitos de fibrocimentos reforçados com fibra de curauá usando fibras com

diferentes teores e comprimentos. Na pesquisa, foram investigados os níveis de fração da fibra presente no compósito (1 e 2%), o comprimento da fibra (6 e 10mm) e o tipo de cura (7 dias ou envelhecimento acelerado – 200 ciclos). Os melhores desempenho mecânico e módulo de ruptura foram obtidos por compósitos reforçados com 2% de fibra de curauá com 10 mm de comprimento e após um envelhecimento acelerado de 200 ciclos. Para os autores, os resultados alcançados servem de incentivo para o uso de compósitos reforçados com fibra de curauá na construção de ambientes internos em itens como teto e divisórias.

Azevedo *et al.* (2020) investigaram o potencial do uso da fibra de curauá como reforço de argamassa para revestimento de paredes de edifícios. A avaliação foi realizada por meio da adição de fibras tratadas com solução de hidróxido de sódio (NaOH) na proporção de 1, 2, 3 e 4% da massa de cimento. Os resultados mostraram que o tratamento das fibras proporciona uma redução na absorção de água e também nos níveis de lignina, hemicelulose e outras impurezas (ceras, cinzas e açúcar), responsáveis pela baixa durabilidade das fibras vegetais. Além disso, as fibras tratadas apresentaram um aumento na resistência mecânica à tração e compressão, atribuído principalmente a redução de 50% do teor de cera. Por fim, os pesquisadores concluíram que o uso de misturas com teor de 2% de fibras tratadas é totalmente viável, atendendo aos parâmetros tecnológicos e de durabilidade.

Já Salgado e Silva (2021) utilizaram a fibra de curauá para reforçar camadas de um compósito cimentício para painéis sanduíches e analisaram o comportamento à flexão desses elementos. Os painéis possuíam dimensões de 35 cm × 60 cm × 90 cm (comprimento × largura × espessura) e eram compostos por três camadas: duas de compósito reforçado com fibra na fração de volume de 7.5%, sendo 10cm cada, e um núcleo pré-fabricado de concreto aerado com 70cm de espessura. A performance dos painéis foi avaliada através de testes de flexão monotônicos e ciclos de quatro pontos, a fim de obter respostas para a deflexão, força de flexão e tenacidade.

Os principais pontos observados nesse trabalho foram a predominância de um modo de ruptura devido a falha na interface argamassa-fibra, considerado o ponto mais frágil do elemento; o adequado controle do surgimento ou aumento de fissuras pelas fibras do curauá, proporcionando melhor resistência e tenacidade no comportamento pós fissuração do material. Os painéis também mostraram bons resultados em termos de rigidez à flexão e taxa de absorção de energia, oferecendo um suporte de carga superior aos painéis com estrutura semelhante, além de exibir um comportamento de material homogêneo com propriedades complementares. Assim, a pesquisa concluiu que, no geral, os painéis sanduíches proporcionaram uma boa relação resistência/peso e alta absorção de energia, possibilitando sua aplicação na construção civil como material leve e sustentável.



De forma geral, o uso da fibra de curauá como material de reforço mostrou ser um avanço bastante promissor e sustentável para a produção de compósitos poliméricos. As pesquisas evidenciaram o potencial da fibra de curauá como substituo das fibras sintéticas tradicionais, destacando sua contribuição no aprimoramento das propriedades dos materiais compósitos e também na redução dos impactos ambientais.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esse trabalho apresenta uma pesquisa experimental voltada para análise do comportamento mecânico de conectores de compósito polimérico reforçados com fibra de curauá a serem utilizados em painéis sanduíches pré-moldados.

As atividades realizadas no programa experimental foram divididas em quatro etapas principais. A primeira etapa consistiu no tratamento das fibras e moldagem dos espécimes com os três tipos de resinas analisadas. Na segunda etapa foram produzidas as três placas compósitas empregando o sistema de infusão à vácuo, também foram realizados os ensaios de tração direta nas resinas e nos compósitos, afim de determinar o desempenho do uso do reforço de curauá. Na terceira etapa os conectores de cisalhamento proposto foram dimensionados e produzidos, também utilizando o sistema de infusão à vácuo. A quarta e última etapa corresponde a produção dos blocos de concreto que representam o painel sanduíche e a realização dos testes *push-out*. A Figura 24 apresenta o fluxograma das atividades desenvolvidas em cada etapa do programa experimental.

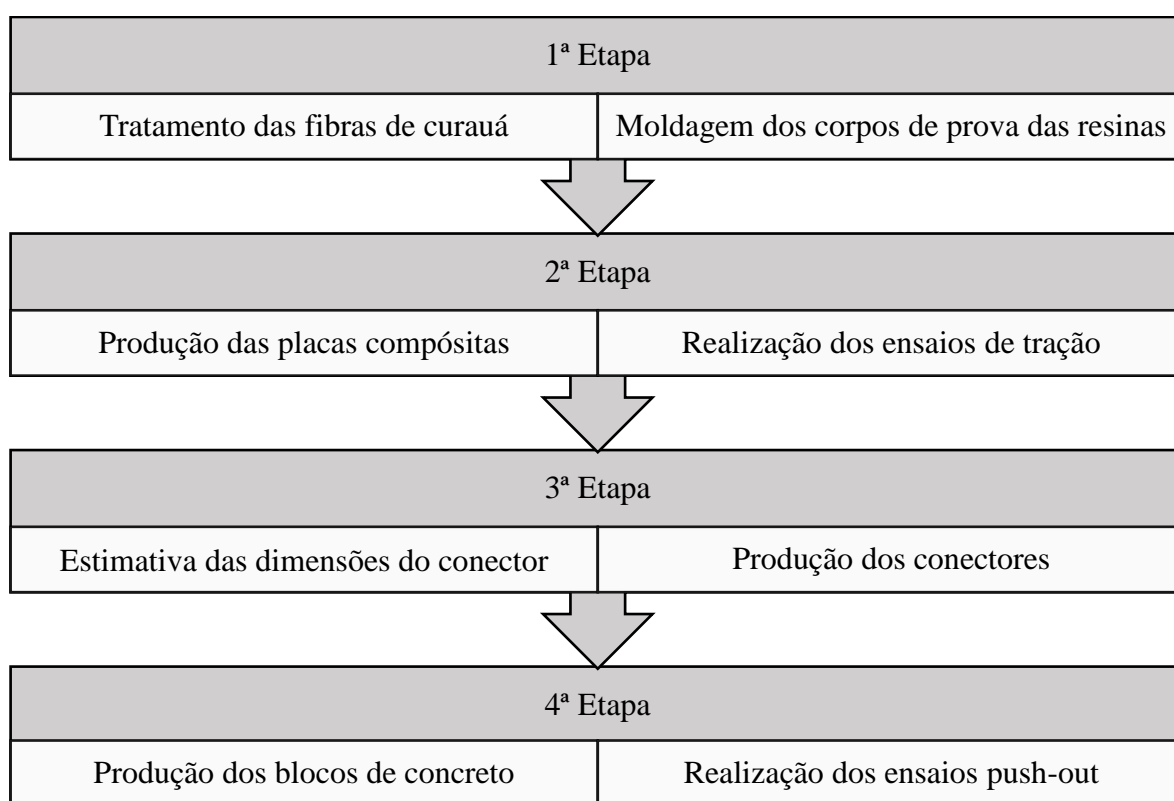


Figura 24 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.

Todas as etapas que envolvem a preparação ou produção de materiais, como tratamento das fibras, produção das placas compósitas e dos conectores e a concretagem dos blocos, foram

realizadas no Laboratório de Estruturas (LABEST). Os ensaios de tração, tanto das resinas quanto dos compósitos, foram realizados no Laboratório de Engenharia Mecânica, enquanto que os testes *push-out* foram conduzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM). Todos os laboratórios estão localizados na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB). Para auxiliar na identificação dos espécimes citados ao longo do texto, a Tabela 12 apresenta a nomenclatura adotada para cada material e a quantidade de amostras ensaiadas.

Tabela 12 – Identificação dos espécimes analisados.

Espécime	Nomenclatura	Quantidade
Matriz Poliéster	PO	5
Matriz Epóxi	EP	5
Matriz poliuretana do óleo da mamona	OM	5
Compósito de poliéster + 70g de curauá	CCPO-070	5
Compósito de epóxi + 70g de curauá	CCEP-070	5
Compósito de óleo de mamona + 70g de curauá	CCOM-070	5
Compósito de poliéster + 175g de curauá	CCPO-175	5
Compósito de epóxi + 175g de curauá	CCEP-175	5
Compósito de óleo de mamona + 175 de curauá	CCOM-175	5
Bloco de concreto com conector de CCPO-175	CONC-CCPO	3
Bloco de concreto com conector de CCEP-175	CONC-CCEP	3
Bloco de concreto com conector de CCOM-175	CONC-CCOM	3

### 3.1. ESTUDOS NA ESCALA DO COMPÓSITO

#### 3.1.1. Tratamento das fibras de curauá

Para alcançar o objetivo desta pesquisa, o primeiro passo foi realizar o tratamento das fibras de curauá a fim de retirar impurezas e melhorar as condições da ligação fibra-matriz. Seguindo as orientações de Beltrami *et al.* (2014), as fibras foram tratadas em uma solução

alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e água destilada em uma concentração de 5% (m/v). Também foi atendida uma proporção de 10:1 entre o volume de solução e massa de fibra, ou seja, cada 1000ml de solução trata 100g de fibra.

Como as fibras de curauá *in natura* possuem muitos nós e resíduos, antes de iniciar o tratamento elas foram desembaraçadas e cortadas, eliminando as partes mais danificadas. Para atender a proporção de 10:1 (solução: fibra), a cada tratamento realizado as fibras foram pesadas afim de definir a quantidade de solução a ser preparada. Vale ressaltar que, para facilitar a preparação da solução alcalina de NaOH, os tratamentos foram realizados utilizando 500g ou 1000g de fibra, o que corresponde a 5000ml ou 10000ml de solução, respectivamente.

As fibras permaneceram imersas na solução de NaOH por 2 horas a uma temperatura de 50°C. Depois, as elas foram lavadas em água potável até atingirem o pH 7 e dispostas em um varal durante 24 horas para secarem à temperatura ambiente. Por fim, as fibras foram separadas em pequenas porções e penteadas, afim de se obter fios mais resistentes e uniformes. A Figura 25 apresenta o aspecto de fibras de curauá antes e depois do processo de tratamento.



Figura 25 - Fibra de curauá: (a) *in natura*; (b) processo de tratamento; (c) fibra penteada.

As fibras tratadas foram usadas para produzir as mantas a serem empegadas na produção do material compósito. As mantas de curauá foram fabricadas com dimensões de 25cm × 40cm e gramatura de 0.035g/cm<sup>2</sup>. O processo de fabricação dessas mantas foi totalmente artesanal e consistiu em pesar as fibras e distribuí-las na área correspondente, afim de formar uma camada de fibras alinhadas unidirecionalmente, como mostra a Figura 26. Para fixar as fibras, as pontas foram presas com fita crepe.



Figura 26 - Manta de curauá.

Além disso, para analisar a eficácia do tratamento alcalino, foi realizada uma análise morfológica das fibras através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). De acordo com Santos (2017), a MEV é uma técnica amplamente utilizada na análise microscópica de superfícies, permitindo visualizar detalhes em microescala, como topografia, rugosidade e porosidade dos materiais.

A análise foi realizada com as fibras antes e depois do tratamento alcalino. A preparação das amostras consistiu, basicamente, em metalizar com ouro uma pequena quantidade de fibras com aproximadamente 1cm de comprimento. Depois, as amostras são posicionadas dentro do microscópio para obtenção das imagens, captadas com aumento de 400× e 1000×.

### **3.1.2. Moldagem dos corpos de prova de resina**

Neste trabalho, foram utilizados três diferentes tipos de resinas, a poliéster ortoftálica, a epóxi 279i e uma resina poliuretana vegetal originada do óleo da mamona. A primeira aplicação desses materiais foi na moldagem de corpos de prova com 18.00mm de largura nas bordas, 12.50mm de largura no meio, 165mm de comprimento e 3mm de espessura, compatíveis com as dimensões do espécime Tipo I da norma D638 (ASTM, 2014). A Figura 27 apresenta o processo de moldagem e os espécimes obtidos.

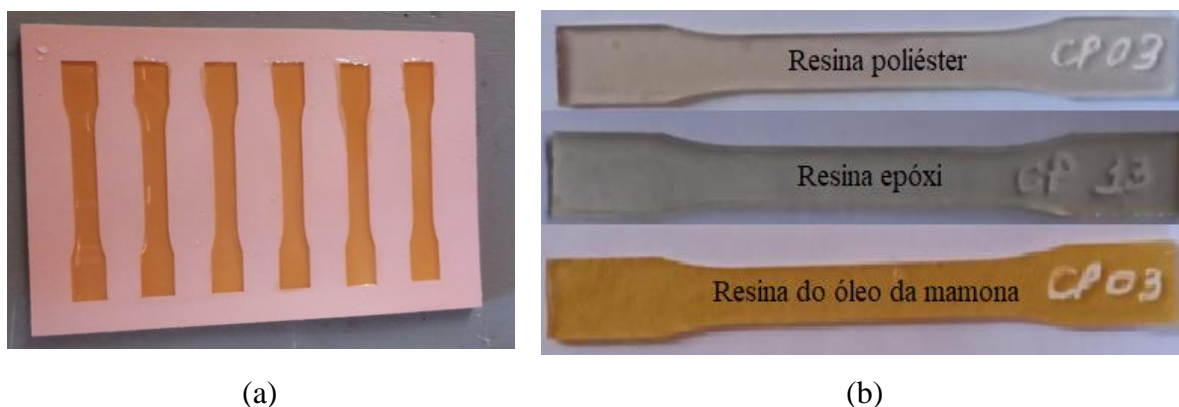


Figura 27 – Resinas: (a) processo de moldagem; (b) corpos de prova para ensaio de tração.

Quanto ao processo, a moldagem foi realizada com auxílio de uma forma de silicone e seguindo o modo de preparação correspondente a cada resina. A resina PO foi preparada adicionando-se um catalisador na proporção de 1% da massa de resina, já a matriz PE 279i inclui a resina e um endurecedor, combinados na proporção de 42g de endurecedor para cada 100g de resina. A matriz OM é fornecida em dois componentes, A que é um pré-polímero e B um polioliol, sendo obtida através da mistura dos dois componentes na proporção em volume de 1:1.5, ou seja, uma parte do componente A e uma parte e meia do componente B.

Para preencher a forma com 6 corpos de prova, foram utilizadas cerca de 25g de resina. Todas as resinas possuem um tempo de trabalho de 15 minutos e tempo de cura de 24 horas, conforme informado nas respectivas fichas técnica. Após o tempo de cura, as resinas PO e EP atingiram uma viscosidade semelhante a um gel, porém, o mesmo não acontece com a poliuretana OM, que demorou cerca de 90 minutos para atingir essa condição.

Depois da moldagem, foi aguardado o tempo de cura para retirar os corpos de prova das formas. Esses espécimes foram preparados para serem testados à tração, afim de se obter as propriedades de tensão das resinas, seguindo as recomendações da norma D638 (ASTM, 2014).

### 3.1.3. Produção dos compósitos através da infusão à vácuo

O processo de fabricação dos materiais compósitos iniciou pela preparação do sistema de infusão à vácuo. A montagem do processo de infusão a vácuo compreende uma placa de vidro (limpa e seca) que recebe previamente 3 demãos de cera de carnaúba, aplicadas em intervalos de 30 minutos, para auxiliar no desmolde. Sobre a cera, são posicionadas as demais camadas na seguinte ordem: peel ply, mantas de curauá, peel ply, air flow, spiradutos, conexões em T e, por fim, o saco de vácuo. Também são utilizadas mangueiras cristal conectadas aos “T”, servindo de um lado como ponto de alimentação da resina e do outro o canal de saída,

ligado a bomba de vácuo, como mostra a Figura 28. Então, todo o sistema é vedado com o uso de fita adesiva selante, de modo que a bomba trabalhe com um nível de vácuo de 85kPa.

A montagem do processo de infusão a vácuo para a produção dos compósitos levou aproximadamente 3 horas, o que incluiu a realização de testes de vácuo para garantir a completa eliminação de ar no sistema. Em contrapartida, a produção dos conectores foi mais demorada, chegando a 5 horas, devido à necessidade de pesar cuidadosamente a quantidade de fibra para cada tira do conector.

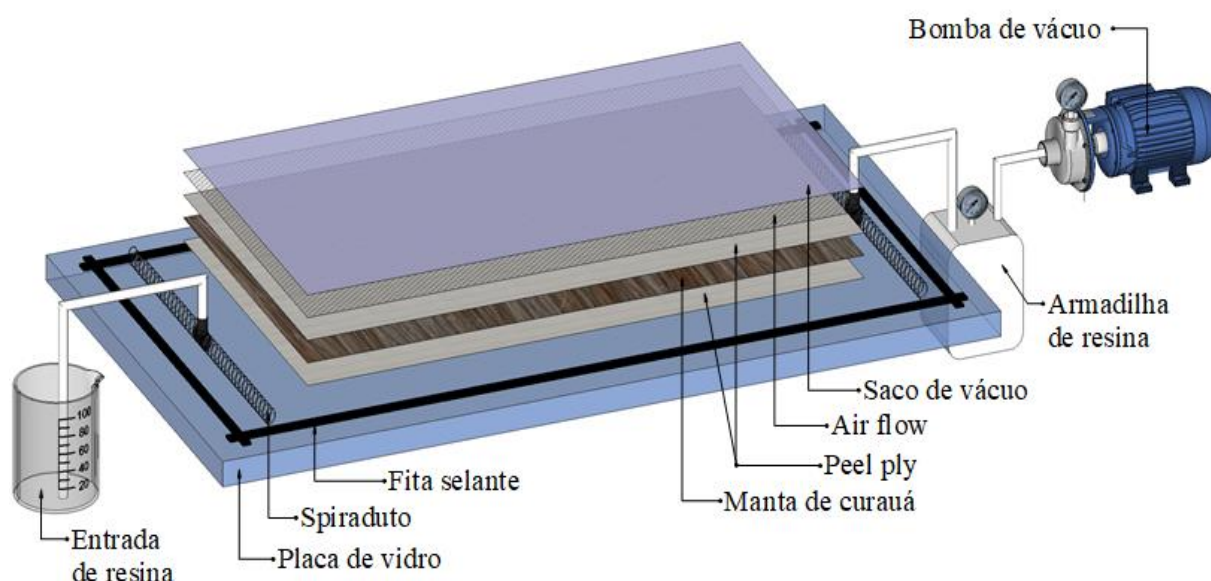


Figura 28 – Esquema de montagem do sistema de infusão à vácuo.

Então, foi fabricada uma placa compósita para cada tipo de resina, nas mesmas dimensões da manta (25cm × 40cm), mas utilizando duas camadas do reforço de curauá (70g de fibra). Em cada infusão foram utilizadas 200g de matriz PO e EP, enquanto para poliuretana OM foram aplicadas 200ml de resina.

Após a conclusão do processo de infusão, foi necessário aguardar o tempo de cura das resinas antes de proceder ao desmolde da placa compósita. As placas foram pesadas e obteve-se massas iguais a 166.95g para o compósito com matriz PO, 160.44g para a matriz EP e 177.86g para a matriz vegetal OM. Com base nesses valores e considerando os dados da literatura de que a fibra de curauá possui uma densidade de 1.40g/cm<sup>3</sup> (NETA *et al.*, 2015; SOLTAN *et al.*, 2017; AZEVEDO *et al.*, 2020) foi determinado que os compósitos produzidos com uma gramatura de 0.070g/cm<sup>2</sup> obedeceram a uma proporção de 40% em volume de fibra e 60% em volume de resina.

É importante relatar que a resina derivada do óleo de mamona apresenta uma maior viscosidade e uma textura pegajosa, o que resultou em dificuldades durante o processo de



desmolde, pois ela tende a aderir ao air flow. No primeiro processo de infusão à vácuo realizado com a matriz OM, a camada composta pelo peel ply e air flow, posicionados sobre a manta de curauá, ofereceu certa resistência à tentativa de ser desmoldada. Provavelmente, isso ocorreu porque o excesso sugado pela bomba de vácuo transpassou o peel ply e o air flow, grudando nessas camadas ao atingir o ponto de cura.

Ao analisar a placa compósita, foi possível perceber regiões com coloração amarelada, indicando os pontos onde a resina transbordou (setas vermelhas na Figura 29). O desmolde dessa placa foi bastante árduo, sendo necessário recorrer a uma lâmina para separar as camadas usadas na infusão e o material compósito. É possível perceber que o uso da lâmina causou danos superficiais na placa compósita (setas amarelas na Figura 29), porém, esses danos não comprometeram a resistência do material.

Para solucionar esse problema, na fabricação do compósito com a resina de mamona, foi utilizada uma camada de filme desmoldante perfurado, posicionado entre o peel ply e o air flow. A presença do filme perfurado auxiliou no desmolde da placa compósita, evitando que a resina OM adira ao air flow.



Figura 29 – Placa compósita com matriz poliuretana do óleo da mamona.

Das placas produzidas pelo processo de infusão à vácuo foram extraídos os espécimes para ensaio de tração em materiais compósitos, conforme diretrizes da norma D3039 (ASTM, 2000), como mostra a Figura 30.



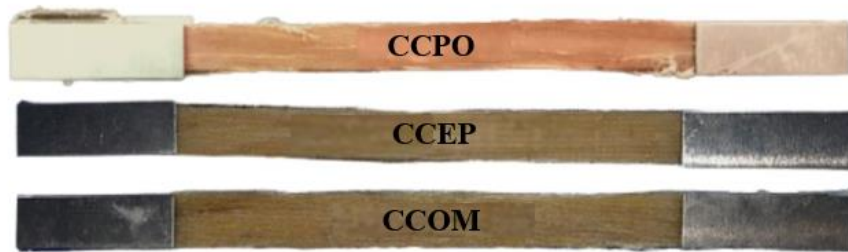


Figura 30 – Corpos de prova dos compósitos para ensaio de tração.

De acordo com a geometria recomendada pela norma D3039 (ASTM, 2000) para fibras orientadas unidirecionalmente a  $0^\circ$  (dispostas na mesma direção de atuação do carregamento), os corpos de prova foram cortados com o uso de uma serra do tipo tico-tico, conforme as seguintes dimensões: 250 mm de comprimento, 15 mm de largura e 1 mm de espessura.

#### 3.1.4. Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram conduzidos seguindo as diretrizes das normas D638 (ASTM, 2014) para materiais plásticos e D3039 (ASTM, 2000) para os materiais compósitos. Os testes foram realizados com o objetivo de determinar a resistência à tração ( $\sigma$ ), módulo de elasticidade (E) e construir o diagrama tensão-deformação. Para cada tipo de resina e compósito polimérico estudado, foram ensaiados cinco corpos de prova, conforme as configurações indicadas na Figura 31.

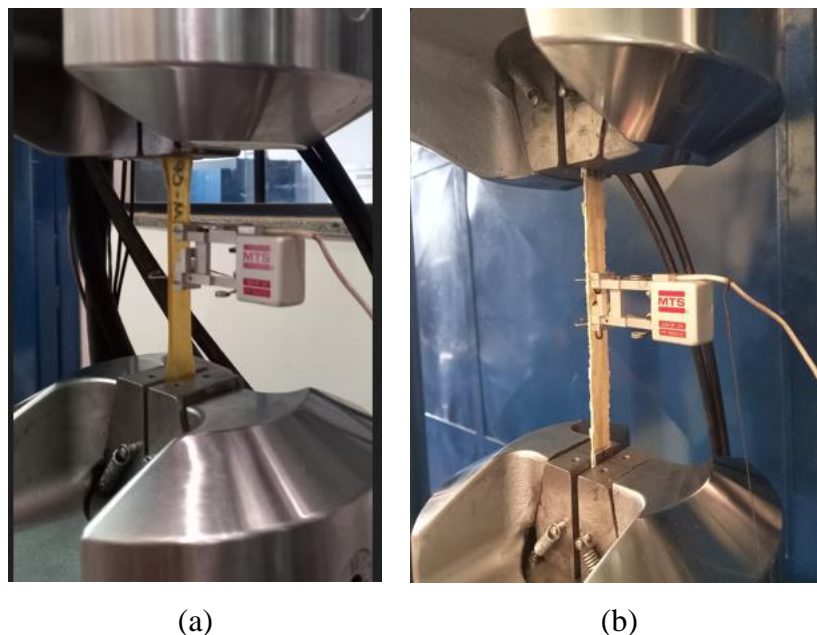


Figura 31 – Realização dos ensaios de tração: (a) matriz polimérica; (b) material compósito.

Os ensaios foram conduzidos utilizando uma máquina MTS LandMark, que estava equipada com uma célula de carga de capacidade de 5kN. A máquina possuía controle de deslocamento e controle de pressão nas garras responsáveis por segurar os corpos de prova. Para estar em conformidade com as diretrizes normativas, os ensaios foram realizados a uma velocidade de deslocamento de 2mm/min. As deformações foram medidas utilizando um extensômetro MTS, com um comprimento de medição de 25mm, posicionado no centro dos corpos de prova (ver Figura 31).

## 3.2. PRODUÇÃO DOS CONECTORES

### 3.2.1. Proposta dos conectores de cisalhamento do tipo rede

O conector de rede reforçado com fibra de curauá proposto consiste em tiras verticais e horizontais dispostas de forma a obter uma grelha. É um formato inspirado nos conectores do tipo rede de pesquisas anteriores, como a de Frankl *et al.* (2008) com tiras de polímero de fibra de carbono orientadas ortogonalmente e Kim e You (2015), que utilizaram fibra de vidro revestida com resina epóxi.

Já as dimensões do conector foram estimadas por meio do software Ftool versão básica 4.00.04, o qual permitiu simular o comportamento dos conectores durante o ensaio *push-out*. Nessa simulação, foram inseridos membros externos representando as camadas de concreto, enquanto os membros internos representaram as tiras do conector, como ilustrado na Figura 32.

No que diz respeito aos parâmetros dos materiais, utilizou-se um concreto com resistência de 30MPa, módulo de elasticidade de 31GPa e seção transversal de 30cm × 30cm. Para o conector, foram empregadas as propriedades mecânicas dos compósitos obtidas nos ensaios de tração, sendo a resistência média igual a 144.59MPa e módulo de elasticidade de 17.76GPa para uma seção transversal de 15mm × 1mm. Além disso, foi considerado que os conectores do tipo rede deveriam resistir a um carregamento similar aos conectores do tipo perfoFRP de Silva (2020), que suportaram cargas de 32kN.

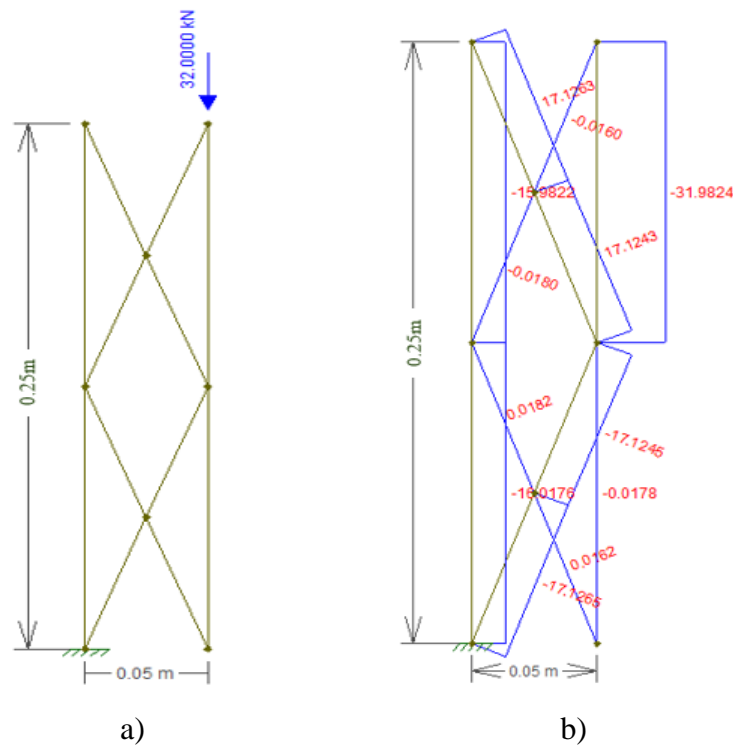


Figura 32 – Simulação do ensaio *push-out* no programa computacional Ftool: (a) modelo de atuação de carga; (b) diagrama de força axial (kN).

Como resultado da análise realizada no software Ftool, foi obtido o diagrama de força axial, que revelou que a maior força axial atuante nos membros internos é de 17.1263kN. Com base nesse valor, juntamente com a resistência à tração do material compósito, foi utilizada a Equação 2 para determinar a área da seção transversal das tiras do conector. Conseqüentemente, obteve-se uma área de seção transversal de 118.45mm<sup>2</sup>.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Com o intuito de facilitar o processo de fabricação, optou-se por adotar uma seção transversal de 30mm × 4mm, equivalente a 120mm<sup>2</sup>. Essa escolha proporciona praticidade na fabricação do conector, mantendo uma área de seção transversal adequada para suportar o carregamento considerado.

As tiras com a seção adotada foram dispostas no formato de 15cm × 25cm para se ajustarem as dimensões dos blocos de concreto a serem utilizados no ensaio *push-out*. A Figura 33 apresenta a configuração final do conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá proposto. É importante ressaltar que, devido à utilização da fibra vegetal, a geometria resultante do conector demonstrou ser robusta em comparação com os conectores do tipo rede encontrados na literatura, que geralmente são reforçados com fibras sintéticas.

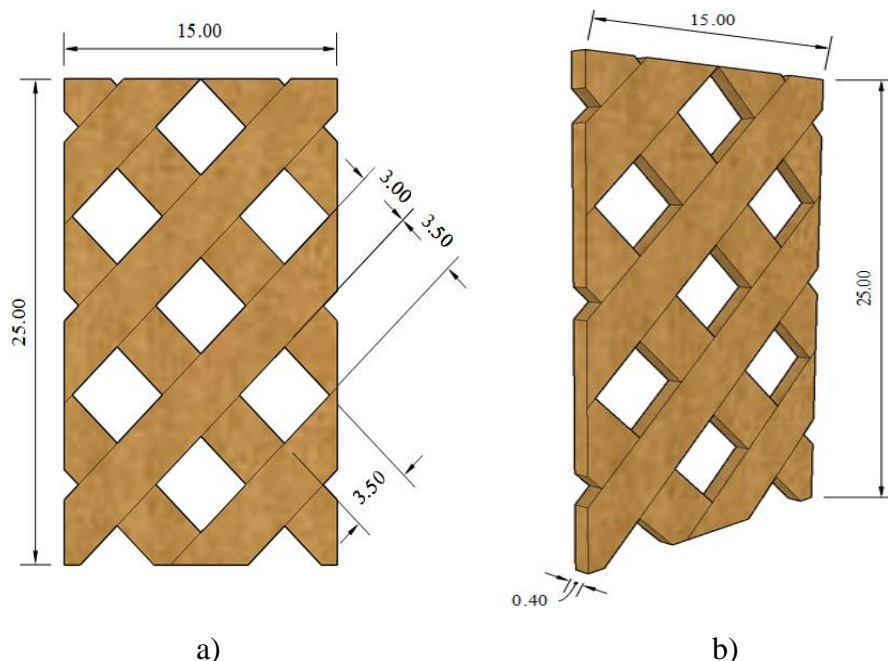


Figura 33 – Conectores do tipo rede propostos: (a) vista frontal; (b) vista isométrica. Todas as unidades em centímetros (cm).

Quanto a aplicação, o intuito é utilizar os conectores do tipo rede como conexões discretas, da mesma forma realizada por Lameiras *et al.* (2021). Os autores utilizaram conectores de cisalhamento que consistiam em chapas de polímero perfurada em uma parede de painel sanduíche em escala real. Os conectores possuíam 40cm e 60cm de comprimento e foram distribuídos regularmente ao longo do painel e posicionados com o comprimento paralelo à altura da parede.

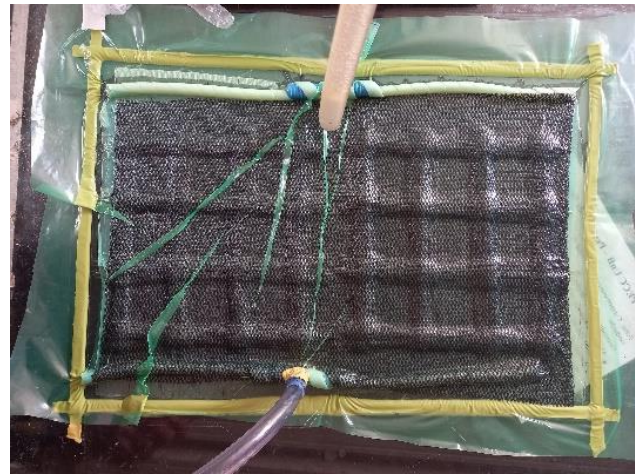
### 3.2.2. Produção dos conectores do tipo rede por infusão à vácuo

Os conectores do tipo rede também foram produzidos utilizando o processo de infusão à vácuo descrito anteriormente. Neste caso, foram fabricadas 6 conexões para cada tipo de matriz analisada: poliéster, epóxi e a poliuretana do óleo da mamona.

Na preparação para a infusão, as fibras foram cortadas com 25cm de comprimento, pesadas e dispostas no formato de rede, conforme a Figura 34(a), mantendo um espaçamento de aproximadamente 3.5cm entre as tiras. Finalizada a infusão à vácuo, foi aguardado 24 horas para desmoldar e cortar os conectores no formato e dimensão necessária para aplicação no bloco de concreto, como mostra a figura 34(c).



(a) Disposição das fibras



(b) Infusão à vácuo



(c) Peça após a infusão



(d) Conector do tipo rede

Figura 34 – Fabricação do conector de cisalhamento do tipo rede com fibra de curauá.

A fim de adequar a espessura da seção transversal do conector a 4 mm, foi necessário aumentar a quantidade de fibra utilizada. Decidiu-se, portanto, utilizar 2 camadas de 6.56g de fibra de curauá para cada tira do conector. Como resultado, houve um aumento na gramatura do compósito de 0.070 g/cm<sup>2</sup> para 0.175 g/cm<sup>2</sup>. Os compósitos com gramatura de 0.175g/cm<sup>2</sup> apresentaram uma inversão nas proporções dos materiais em comparação aos compósitos com 0.070 g/cm<sup>2</sup> de fibra, atendendo agora a uma proporção de 60% em volume de fibra e 40% em volume de resina.

Devido a essa alteração nas proporções do compósito, foram conduzidos novos testes de tração para avaliar as propriedades mecânicas do novo material. Com o objetivo de alcançar a nova gramatura, placas compósitas foram fabricadas com dimensões de 15cm × 25cm, que corresponde a 375cm<sup>2</sup> e 65.62g de fibra de curauá, para cada tipo de resina utilizada. De cada placa compósita foram extraídos 5 espécimes para realização dos ensaios de tração, semelhantes aos corpos de prova apresentado na Figura 30.



### 3.3. MODELO EXPERIMENTAL DO ENSAIO *PUSH-OUT*

#### 3.3.1. Descrição dos espécimes para ensaio *push-out*

Os corpos de prova a serem utilizados no ensaio *push-out* foram produzidos conforme a geometria utilizada nas pesquisas de Huang e Dai (2019) e Silva (2020), com dimensões de 30cm (altura)  $\times$  40cm (largura)  $\times$  30cm (espessura), como mostra a Figura 35. Os espécimes consistem em blocos de concreto armado dotado de uma camada isolante de EPS, que representam uma parede pré-moldada de painel sanduíche.

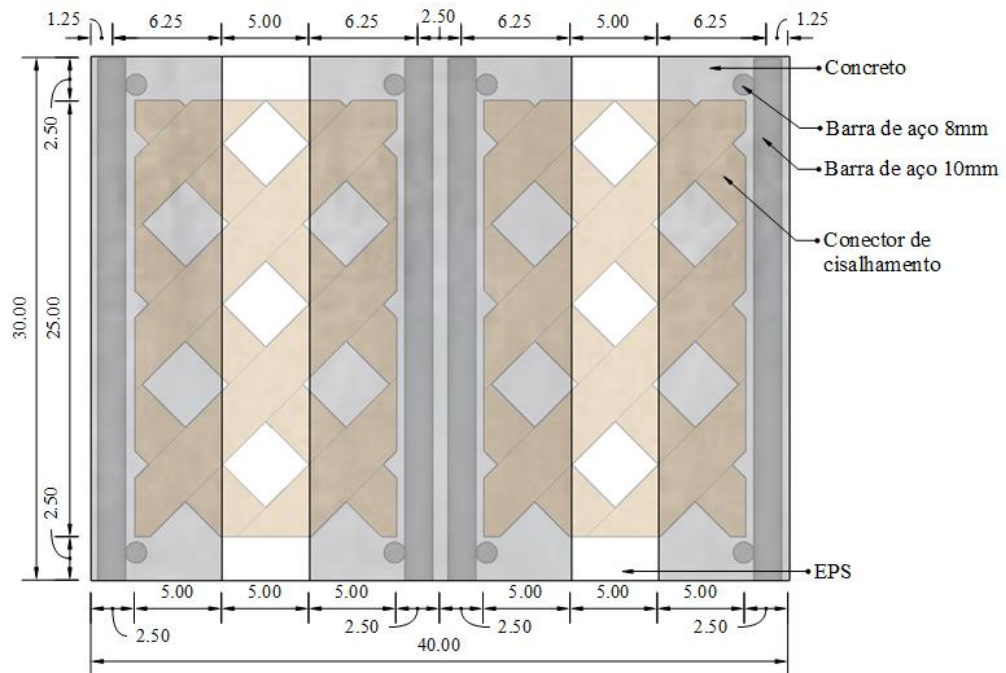


Figura 35 – Vista frontal do bloco de concreto (todas as unidades em cm).

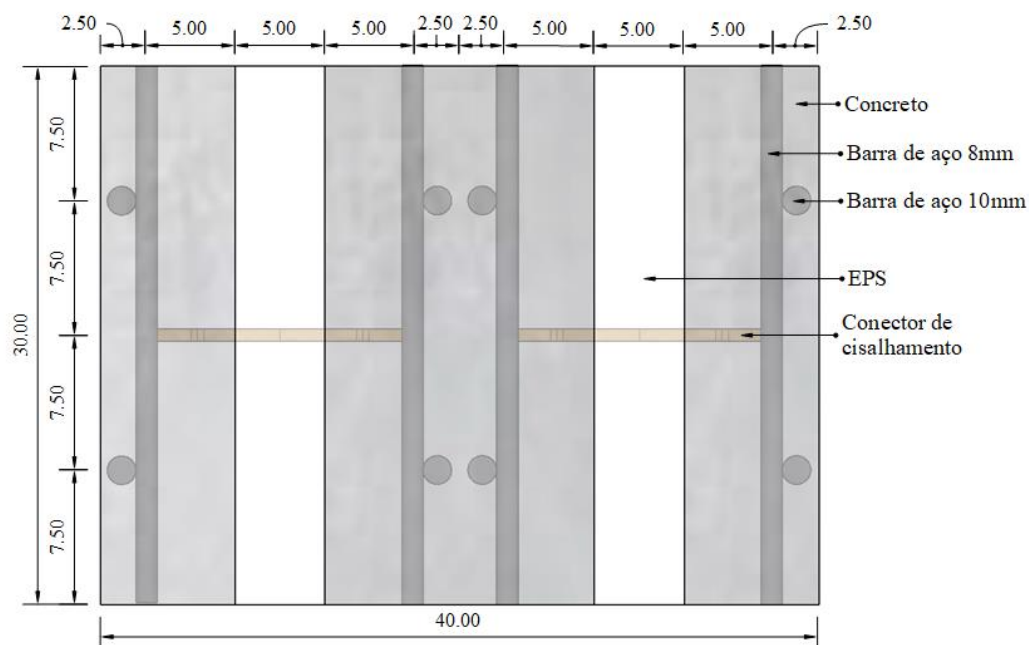


Figura 36 – Vista superior do bloco de concreto (todas as unidades em cm).

Os conectores de cisalhamento do modelo possuem dimensão de 15cm (largura)  $\times$  25cm (altura) e foram posicionados de forma centralizada dentro dos blocos de concreto. Essa configuração garantiu ao conector um cobrimento de 2.5cm em todas as direções e permitiu também utilizar o espaçamento entre as tiras do conector como pontos de ancoragem ao concreto.

### 3.3.2. Produção dos blocos de concreto

A Figura 37 apresenta o processo de fabricação dos blocos de concreto. A produção foi realizada seguindo as seguintes etapas: fabricação das formas de madeira, montagem e instalação da armadura, corte do EPS, fixação do conector no EPS, instalação do conjunto EPS-conector nas formas e concretagem dos blocos.

A placa de EPS utilizada possuía medidas de 100cm  $\times$  50cm e foram cortadas com dimensões de 30cm  $\times$  30cm para se ajustarem as medidas do bloco de concreto. Para fixar o conector no EPS, foi realizado um corte no meio da placa de 30cm  $\times$  30cm, com altura de 25cm, afim de criar um encaixe adequado para o conector.



a) Instalação dos elementos construtivos

b) Concretagem do bloco

c) Bloco de concreto

Figura 37 – Processo de fabricação dos corpos de prova de concreto.

As camadas de concreto dos blocos foram reforçadas com armadura de aço 10mm posicionados na vertical e aço 8mm na horizontal (ver Figura 36). Já a camada de isolamento foi feita com blocos de EPS de 30cm × 30cm × 5cm (ver Figura 36), para encaixar na configuração da forma de madeira. Além disso, foi feito um corte de 25cm de altura no centro do EPS para instalação do conector.

O concreto utilizado consistiu em um concreto autoadensável, produzido utilizando-se 852.5kg/m<sup>3</sup> de brita, 633.3kg/m<sup>3</sup> de areia, 498.5kg/m<sup>3</sup> de cimento Portland CP V- ARI, 133.50kg/m<sup>3</sup> de fíler calcário, 231kg/m<sup>3</sup> de água e 9,20kg/m<sup>3</sup> de super plastificante MasterGlenium 51, conforme Cardoso (2020). O concreto foi produzido com auxílio de betoneira mecânica e apresentou um espalhamento médio igual a 55cm no *Flow Test*.

Os ensaios de determinação da resistência à compressão do concreto foram realizados em corpos de prova cilíndricos com 10cm de diâmetro e 20cm de altura. Os testes de compressão foram realizados no mesmo dia dos ensaios *push-out*, nas idades de 17, 21 e 22 dias, sendo obtida uma resistência média igual a 22.96MPa, 30.70MPa e 38.32MPa, respectivamente.

### 3.3.3. Ensaios *push-out*

Para obter o comportamento ao cisalhamento das conexões entre o concreto e os conectores propostos neste trabalho, testes foram preparados de acordo com a configuração apresentada na Figura 38. Os ensaios foram realizados em 9 corpos de prova, 3 para cada resina analisada e consistiu, basicamente, em apoiar as camadas externas de concreto em placas metálicas e aplicar um carregamento na camada interna de concreto, fazendo com que haja um deslocamento para baixo que provoque o cisalhamento dos conectores.



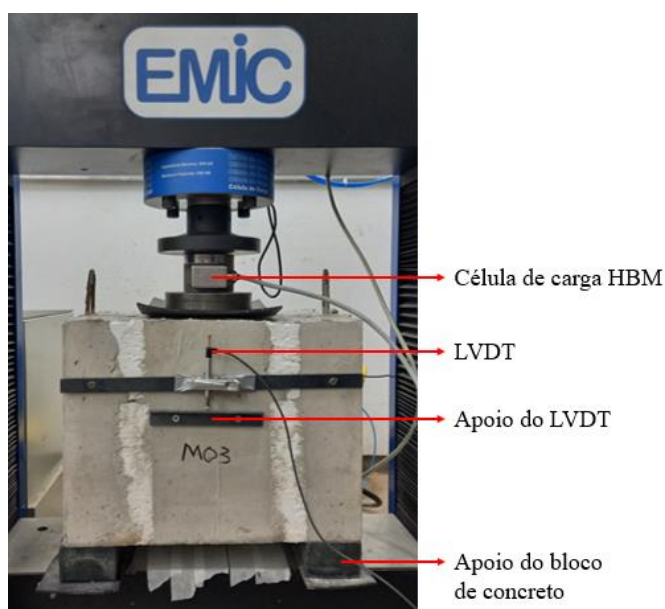


Figura 38 – Configuração experimental utilizada para realização do ensaio *push-out*.

Os ensaios foram realizados em uma prensa universal EMIC DL, com controle de deslocamento. Os testes foram realizados com velocidades de 0,1mm/min até 4mm de deslocamento relativo entre as camadas externas e interna e 0,5mm/min de 4mm até 30mm de deslocamento relativo. Esta velocidade foi mantida até a ruptura dos conectores, verificada pela queda na leitura do carregamento.

Os deslocamentos relativos entre as camadas externas e a camada interna de concreto foram obtidos fazendo-se uso de dois transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT). Estes transdutores foram posicionados na camada interna de concreto, dos dois lados do corpo de prova. As cargas aplicadas foram determinadas fazendo-se uso de uma célula de carga da HBM com capacidade de 500kN. A leitura dos dados desses equipamentos foi realizada através do módulo de aquisição Spider 8, da HBM a uma frequência de 1Hz. Ao fim dos ensaios, os conectores foram extraídos dos blocos de concretos para análise das fissuras e modo de ruptura.

Os resultados obtidos nos ensaios *push-out* foram empregados para a determinação de parâmetros destinados à análise dos conectores, tais como: carga máxima, curvas de carregamento  $\times$  deslocamento, ductilidade e rigidez. No contexto das curvas de carregamento  $\times$  deslocamento, a força representada se refere a capacidade de carga dos conectores. Essa capacidade de carga foi calculada dividindo-se pela metade a carga máxima registrada durante os ensaios *push-out*, uma vez que se considerou que cada conector presente no bloco de concreto suportou metade do carregamento total. Já os deslocamentos relativos foram obtidos ao realizar a média aritmética das leituras provenientes dos dois LVDTs para uma determinada carga aplicada.

Por fim, a rigidez dos conectores foi determinada através da razão entre a média da força máxima e a média dos deslocamentos correspondentes à força máxima. A rigidez foi determinada para cada bloco de concreto submetido a teste, e, subsequentemente, uma média desses resultados foi calculada, representando a rigidez do conector para cada tipo de compósito estudado.

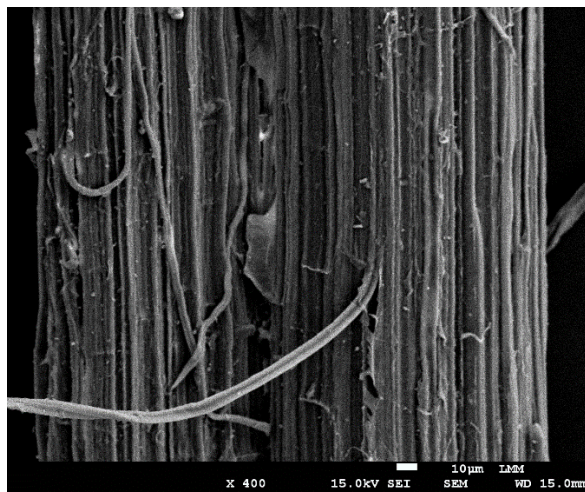
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da execução do programa experimental, divididos da seguinte forma: (a) Caracterização dos materiais, abrangendo a análise qualitativa do tratamento das fibras, bem como as propriedades de tração das matrizes e dos compósitos; (b) Avaliação do desempenho do conector do tipo rede proposto durante os ensaios de cisalhamento duplo (*push-out*).

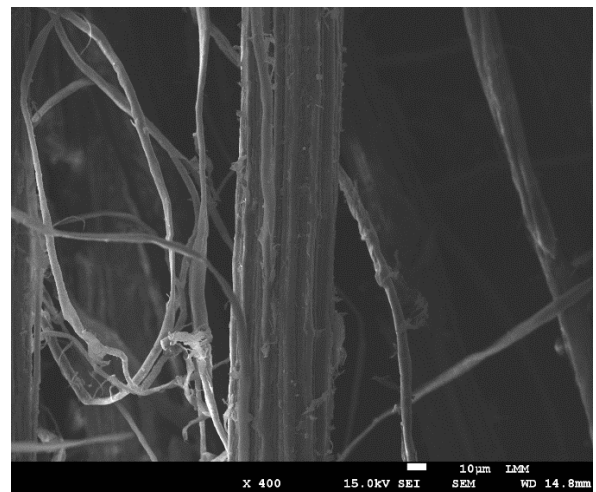
### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1. Microscopia eletrônica de varredura

O resultado da microscopia eletrônica de varredura (MEV) é apresentado na Figura 39. As imagens mostram a fibra de curauá antes e depois do tratamento alcalino com um aumento de 400× e 1000×, que permite realizar uma análise qualitativa do tratamento aplicado.



(a)



(b)

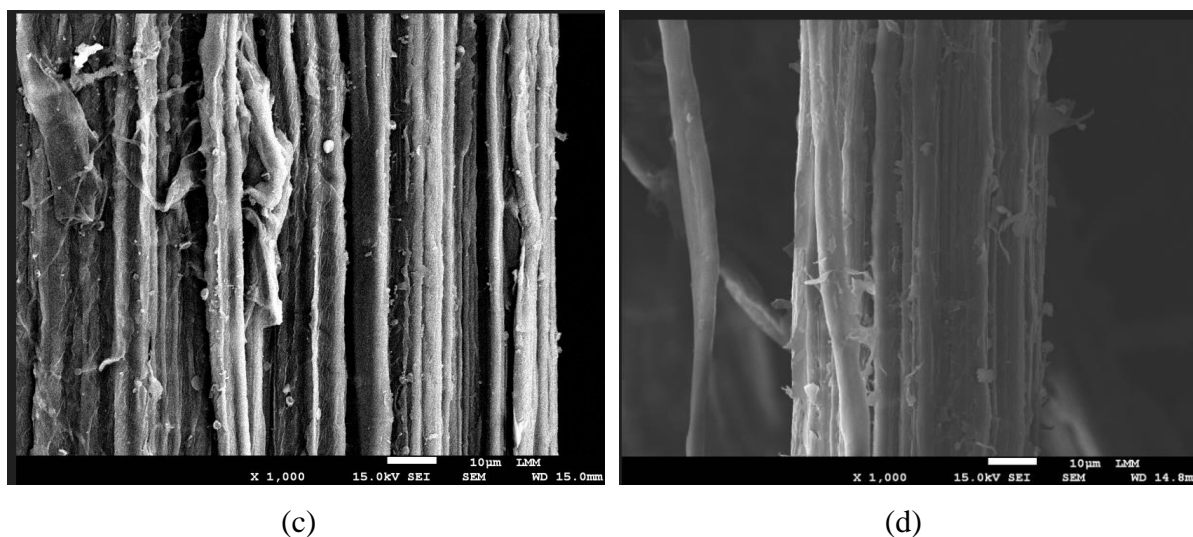


Figura 39 – Microscopia da fibra de curauá: (a) fibra *in natura* 400×; (b) fibra tratada 400×; (c) fibra *in natura* 1000×; (d) fibra tratada 1000×.

Com base nas imagens, pode-se observar que a fibra de curauá é composta por um agrupamento de micro fios, conhecidos como fibrilas. Além disso, pode-se perceber que, para o mesmo nível de ampliação, houve uma redução significativa no tamanho das fibras tratadas e não tratadas. Essa redução pode ser resultado do desgaste superficial da fibra ou da separação das fibrilas, provocados pelo tratamento alcalino.

E, da mesma forma que relatado por Beltrami *et al.* (2014), notou-se a remoção dos componentes amorfos na superfície da fibra e a exposição das micro fibrilas, o que provoca desfibrilação e o aumento da rugosidade superficial. Como consequência, espera-se que a resina seja capaz de impregnar a fibra de maneira mais eficiente, melhorando a aderência entre a fibra e a matriz.

#### 4.1.2. Propriedades mecânica das matrizes

A Figura 40 apresenta as curvas tensão × deformação obtidas com base nos resultados dos ensaios de tração das resinas estudadas, realizados com o intuito de avaliar a influência da fibra de curauá na resistência final dos compósitos. Os dados dos testes de tração também servirão de base para estimar as propriedades de tensão e módulo de elasticidade da fibra para cada compósito produzido.

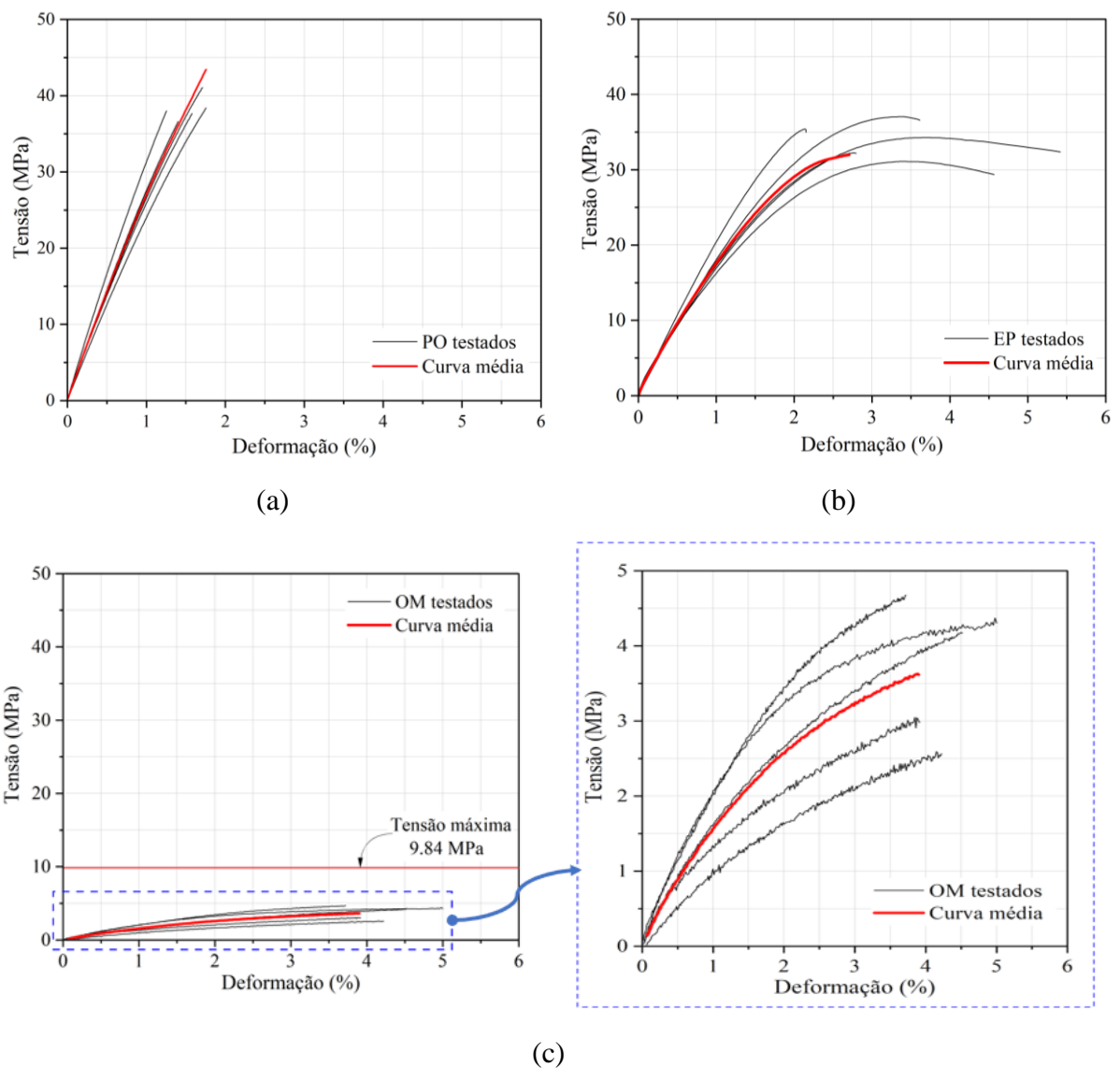


Figura 40 – Curva tensão  $\times$  deformação da matriz: (a) poliéster; (b) epóxi; (c) óleo de mamona.

As curvas apresentadas mostram que as resinas sintéticas possuem resistência a tração muito superior a resina de origem vegetal. Enquanto as resinas poliéster e epóxi atingiram valores de tensão próximos a 40MPa, a tensão máxima alcançada pela resina de mamona foi de apenas 9.84MPa. Essa discrepância é ainda mais evidenciada pela aproximação feita nas curvas tensão  $\times$  deformação da matriz de mamona, pois para visualizar melhor os dados apresentados, foi necessário reduzir a escala da tensão (eixo vertical) em 10 $\times$ .

Para a deformação, o poliéster puro mostrou ser o material com menor capacidade para se deformar elasticamente, variando de 1-2%, à medida que a deformação do epóxi puro variou cerca de 2-6%. Já para a resina de mamona, por ser um material muito flexível, não foi possível medir sua deformação até a ruptura, pois a deformação da resina de mamona excedeu o limite de alongamento do extensômetro utilizado no ensaio, sendo o aparelho retirado na marca de aproximadamente 4% de deformação. É importante relatar que, em termos de deslocamento

(distanciamento das garras da máquina), as amostras da resina do óleo da mamona ensaiadas a tração alcançaram um alongamento superior a 30mm.

Ainda conforme as curvas tensão × deformação apresentadas, foi determinado o módulo de elasticidade das matrizes testadas. Através da análise dessas curvas, verificou-se que as resinas exibiram um comportamento linear até atingirem uma deformação de aproximadamente 0.5%. Com base nisso, utilizando a Lei de Hooke, foi possível calcular o módulo de elasticidade para cada ponto até o limite de deformação de 0.5%. A média desses valores foi então determinada, representando o módulo de elasticidade do espécime em questão. Conseqüentemente, o valor médio obtido a partir das 5 amostras ensaiadas foi considerado como o módulo de elasticidade característico da matriz.

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, bem como as demais propriedades mecânicas das resinas determinadas através dos testes de tração. Vale ressaltar que os valores apresentados para cada material correspondem a média de cada amostra ensaiada (5 espécimes).

Tabela 13 – Propriedades mecânicas de tração das resinas.

Resinas	Força máxima		Resistência a tração		Módulo de elasticidade		Deformação correspondente à força máxima	
	Média (N)	CoV (%)	Média (MPa)	CoV (%)	(GPa)	CoV (%)	(%)	CoV (%)
Poliéster	1352.96	4.33	38.35	4.33	3.05	11.06	1.54	10.35
Epóxi	1349.29	7.00	34.00	7.00	2.25	14.00	3.71	35.44
Óleo de mamona	260.70	30.22	6.95	30.22	0.24	45.51	-	-

Os resultados obtidos nos ensaios de tração para a matriz de poliéster estão consistentes com os valores reportados na literatura. Por exemplo, conforme observado por Malick (2017), os intervalos típicos para resistência à tração variam de 35MPa a 104MPa, enquanto o módulo de elasticidade normalmente se situa entre 2.75GPa e 4.1GPa. Neste caso, os valores experimentais se encontraram dentro desses intervalos, com uma resistência à tração de 38.35MPa e um módulo de elasticidade de 3.05GPa, corroborando assim os achados previamente descritos (ver Tabela 5).

Em contrapartida, observou-se que os resultados derivados dos ensaios de tração para a resina epóxi não coincidiram com os valores previamente documentados por Malick (2017). Segundo o autor, a resina epóxi possui uma resistência a tração entre 55MPa e 130MPa, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2.75GPa a 4.1GPa. Contudo, os resultados obtidos

nos ensaios desta pesquisa apresentaram uma resistência à tração de 34MPa e um módulo de elasticidade de 2.25GPa, ambos abaixo dos valores encontrados na literatura.

No caso da resina poliuretana derivada do óleo de mamona, a literatura apresenta uma variação notável nos resultados de resistência à tração. Enquanto o estudo de Milanese (2008) reportou uma resistência de 2.5MPa, Sousa (2013) obteve um valor mais elevado de 9.99MPa, acompanhado de um módulo de elasticidade de 0.58MPa. Neste caso, os ensaios de tração revelaram valores médios que se situam dentro do intervalo delineado pelos dois estudos citados. Sendo interessante observar que dentro da amostra ensaiada, apenas um dos espécimes testados se aproximou do resultado total de Sousa (2013), alcançando 9.84MPa.

Sousa (2013) atribuiu a disparidade nas propriedades da resina do óleo da mamona a ampla variação de rigidez que a resina pode apresentar em sua produção, resultado em propriedades distintas para cada fabricante. Já Milanese (2008) realizou uma microscopia eletrônica de varredura para analisar as amostras de resina rompidas e identificou a formação de vazios na superfície. A autora concluiu que a baixa resistência determinada para a poliuretana do óleo da mamona é resultado do grande número de vazios que se desenvolvem durante o processo de cura. Esses vazios podem ser gerados pelo aprisionamento de gases voláteis durante a polimerização da matriz.

Em suma, a comparação das propriedades das matrizes poliéster, epóxi e da poliuretana do óleo da mamona apresentadas nesta pesquisa com os valores da literatura serve para aferir a confiabilidade dos ensaios realizados e dos dados obtidos. Sendo que, enquanto um resultado se mostra coerente o outro apresenta divergências, reforçando que existe a influência de diversos fatores nos parâmetros analisados, como relação da mistura na produção dos corpos de prova, condições ambientais de fabricação e cura e condições de realização dos ensaios.

#### **4.1.3. Propriedades mecânica dos compósitos**

Ainda no contexto de determinar as características dos materiais através do ensaio de tração, é fundamental expandir a análise para incorporação das fibras de curauá nas matrizes, que consiste nos compósitos poliméricos. Conforme mencionado previamente, para cada tipo de resina, foram produzidos compósitos destinados aos ensaios de tração, com gramaturas distintas de fibras de curauá, 0.070 g/cm<sup>2</sup> e 0.175 g/cm<sup>2</sup>, que resultaram em diferentes proporções dos materiais. Os compósitos produzidos com uma gramatura de 0.070g/cm<sup>2</sup> obedeceram a uma proporção de 40% em volume de fibra e 60% em volume de resina, determinada com base na massa da placa compósita e na quantidade de fibras utilizadas. Por

outro lado, os compósitos com gramatura de  $0.175\text{g/cm}^2$  apresentaram uma inversão desses valores, atendendo a uma proporção de 60% em volume de fibra e 40% em volume de resina.

Essa diferença na quantidade dos materiais que compõem o compósito influencia diretamente nas características mecânicas determinadas por meio do ensaio de tração, contribuindo para divergência na capacidade de carga e deformação entre os dois tipos de compósitos analisados. Mas, no geral, o primeiro ponto notável nos resultados dos ensaios é que, independentemente da quantidade de fibra empregada na formulação dos compósitos, houve um incremento na resistência à tração de todos os materiais analisados.

As Figuras 41 e 42 ilustram as curvas tensão  $\times$  deformação resultante dos ensaios dos compósitos com as quantidades de fibras de curauá  $0.070\text{ g/cm}^2$  e  $0.175\text{ g/cm}^2$ , respectivamente. É importante destacar que o compósito contendo  $0.175\text{ g/cm}^2$  de fibras exibiu um comportamento mais frágil durante os ensaios, por isso o extensômetro só foi utilizado até alcançar aproximadamente 0.6% da deformação do material.

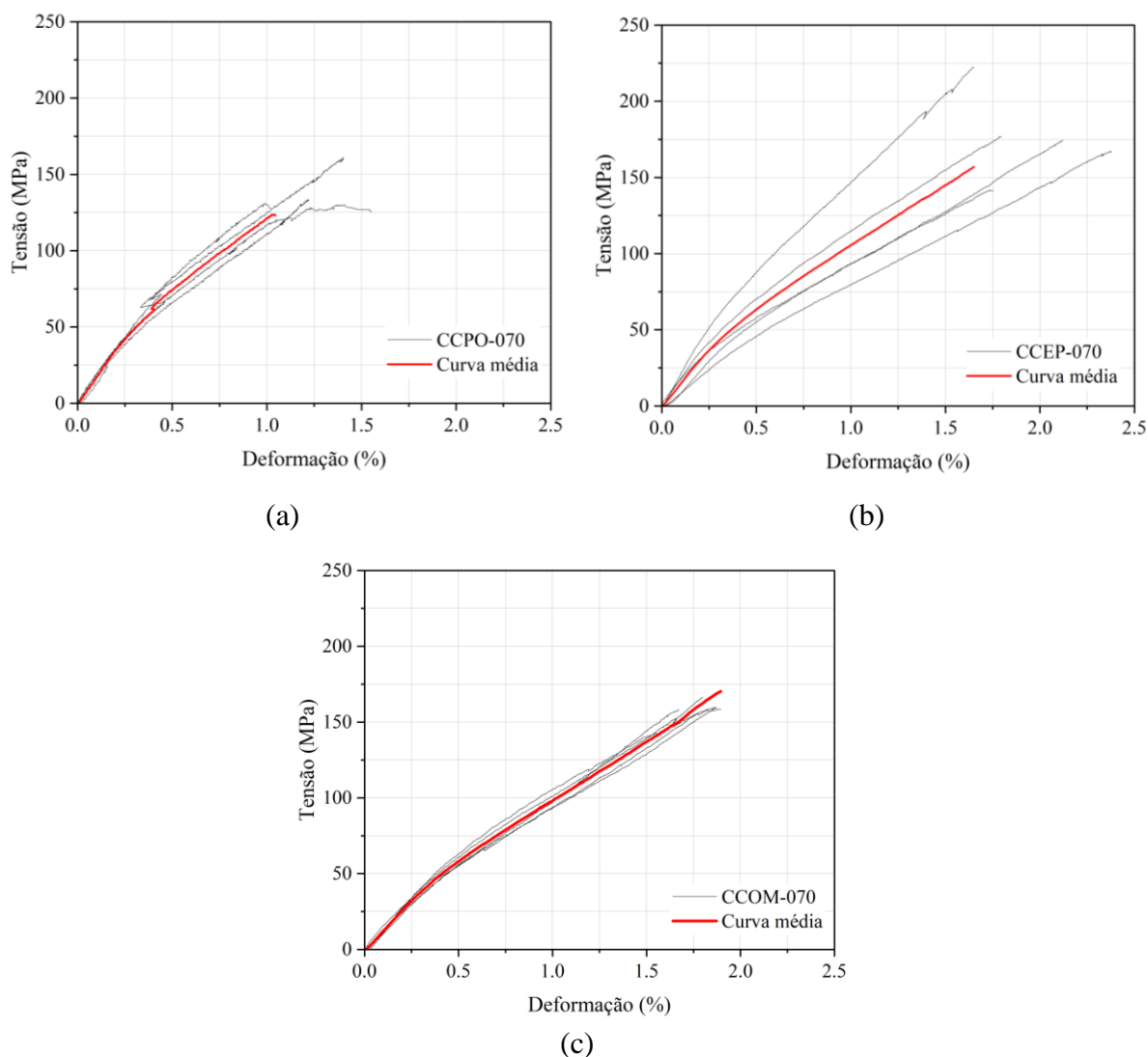


Figura 41 – Curva tensão  $\times$  deformação dos compósitos: (a) CCPO-070; (b) CCEP-070; (c) CCOM-070.



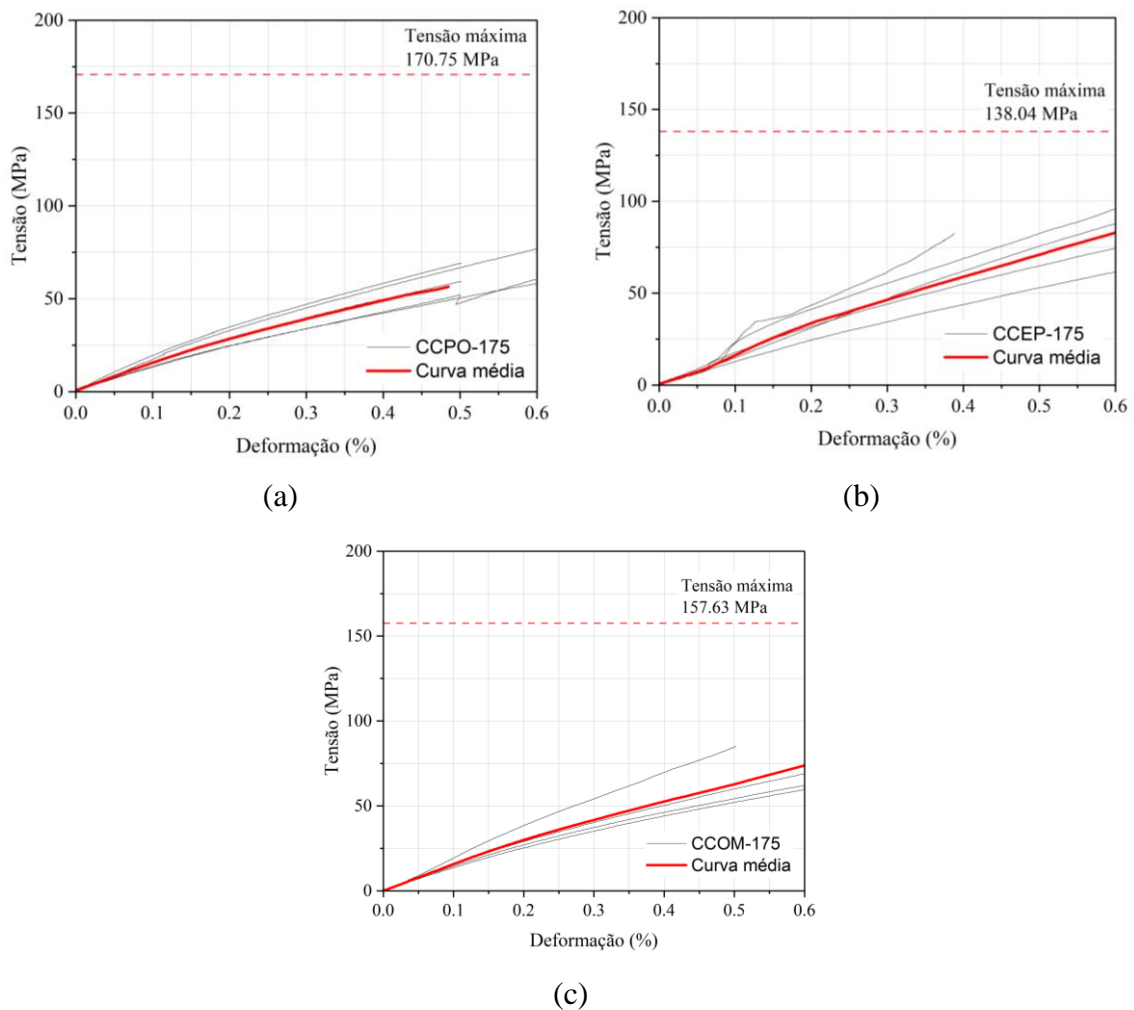


Figura 42 – Curva tensão × deformação dos compósitos: (a) CCPO-175; (b) CCEP-175; (c) CCOM-175.

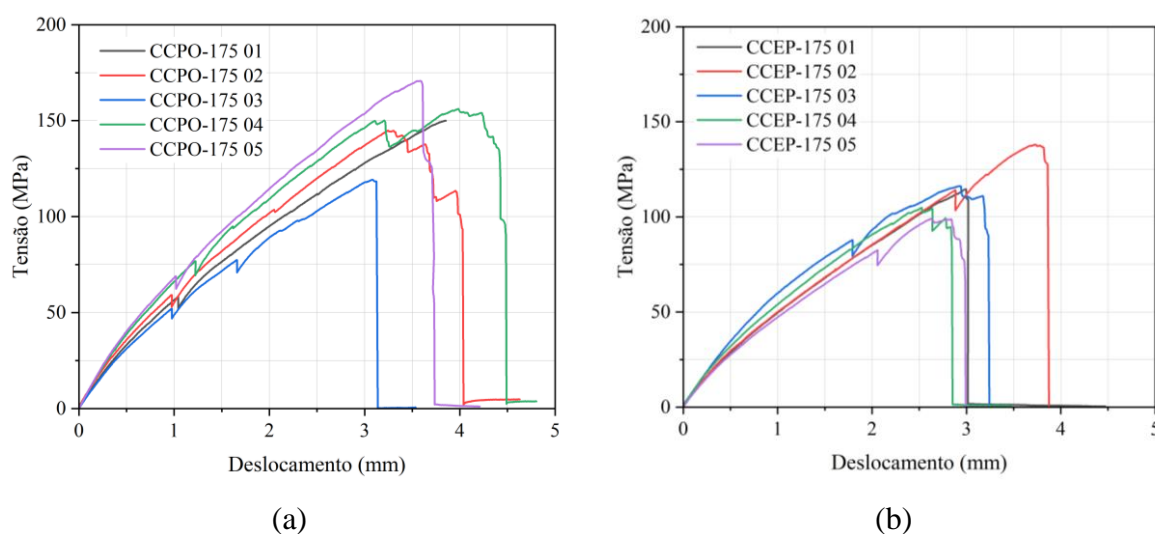
As curvas mostram que os compósitos produzidos possuem comportamento não linear, onde se destaca uma redução significativa do trecho linear em comparação com as curvas associadas às resinas. Tratando especificamente do compósito com  $0.070\text{g/cm}^2$  de fibra, as resistências e deformações mais expressivas foram demonstradas pelos CCEP, seguido pelo CCOM, podendo o desempenho desses materiais no ensaio de tração ser considerado semelhante. Em contraste, o compósito CCPO exibiu as menores resistência e deformação, indicando ser o material mais frágil devido à alta rigidez apresentada.

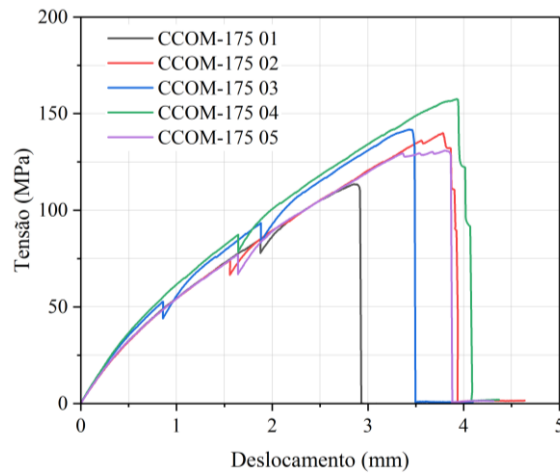
Para a resina de mamona a adição da fibra de curauá teve um impacto significativo na resistência e rigidez dos compósitos, fornecendo novas perspectivas sobre as propriedades mecânicas desses materiais. Na resistência essa influência pode ser notada tanto nos próprios valores de capacidade de carga obtidos nos ensaios de tração quanto nas curvas, quando o material deixa de ser apresentado em uma escala  $10\times$  inferior para níveis comparáveis diretamente com os resultados das demais matrizes. Já no quesito rigidez, diferentemente do que ocorreu para a matriz de óleo de mamona isolada, onde não foi possível determinar a

deformação até a ruptura, a adição da fibra de curauá como reforço resultou em uma notável diminuição na deformabilidade do material. Isso possibilitou o uso do extensômetro durante todo o ensaio, medindo assim a deformação até o ponto de ruptura.

Continuando a análise das curvas tensão  $\times$  deformação, os resultados obtidos para os compósitos com uma gramatura de  $0.175\text{g/cm}^2$  de fibras revelaram um aspecto interessante: o aumento na quantidade de fibras não implica necessariamente no aumento da resistência do material. Essa melhoria foi observada apenas para o CCPO-175, mas de forma moderada. No entanto, o aumento da quantidade de fibras no compósito acarretou em uma redução na capacidade de deformação, uma vez que a fibra é a componente mais rígida do compósito e está agora em maior proporção na composição. Por isso, como citado anteriormente, para os compósitos com  $0.175\text{g/cm}^2$  de fibras não foi possível medir a deformação até a ruptura, pois devido ao aumento da rigidez o material apresentou um comportamento frágil que poderia vir a danificar o aparelho de medição.

Para fins de conhecimento, é ilustrado na Figura 43 as curvas tensão  $\times$  deslocamento, referente ao deslocamento das garras da máquina, obtida com base nos ensaios dos compósitos com  $0.175\text{g/cm}^2$  de fibras de curauá.





(c)

Figura 43 – Curva tensão  $\times$  deslocamento dos compósitos: (a) CCPO-175; (b) CCEP-175; (c) CCOM-175.

Nessa configuração, é possível observar que os compósitos com  $0.175\text{g/cm}^2$  de fibras exibiram um comportamento bastante semelhante. Além disso, em todas as curvas foram identificadas regiões onde ocorre uma breve queda seguida do aumento do carregamento. Esse fenômeno foi compreendido como se ocorre o reagrupamento dos materiais para suportar um carregamento maior até alcançar a ruptura.

De maneira análoga ao procedimento adotado para as resinas, as curvas de tensão  $\times$  deformação dos compósitos serviu de base para determinar o módulo de elasticidade desses materiais. Porém, neste caso, devido à redução e indefinição do trecho linear nas curvas, optou-se por calcular o módulo de elasticidade de cada ponto até o limite de 0.25% de deformação. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos materiais compósitos reforçados com fibra de curauá conforme cada gramatura utilizada, e também os valores médios das propriedades mecânicas desses materiais determinadas nos ensaios de tração.

Tabela 14 – Propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibra de curauá.

Compósito	Força máxima		Resistência a tração		Módulo de elasticidade		Deformação correspondente à força máxima	
	Média (N)	CoV (%)	Média (MPa)	CoV (%)	(GPa)	CoV (%)	(%)	CoV (%)
CCPO-070	2168.89	12.38	144.59	12.38	17.76	15.71	1.30	15.33
CCPO-175	8393.98	12.74	148.22	12.74	16.32	14.14	0.60	20.36
CCEP-070	2649.41	16.63	176.63	16.63	14.22	41.00	2.52	43.77
CCEP-175	6860.67	13.02	114.54	13.02	17.64	20.02	0.88	26.97
CCOM-070	2407.09	2.04	160.47	2.04	11.42	22.73	2.02	16.93
CCOM-175	7943.77	11.81	136.79	11.81	15.64	14.76	0.72	30.44

Ao analisar os resultados na Tabela 14, é possível destacar algumas tendências notáveis. Começando pelas propriedades de resistência à tração, observamos que, em geral, os compósitos com maior proporção de fibras ( $0.175\text{g/cm}^2$ ) apresentaram um aumento significativo na capacidade de carga, mas como citado anteriormente, não demonstraram uma vantagem expressiva em termos de tensão quando comparados àqueles com menor quantidade de fibra ( $0.070\text{g/cm}^2$ ).

No que diz respeito ao módulo de elasticidade, uma tendência inversa emerge. Os compósitos com maior quantidade de fibra exibiram módulos de elasticidade levemente superior em comparação com aqueles com menos fibra. Isso indica que a rigidez dos materiais aumentou com o aumento da quantidade de fibra. Esse comportamento pode ser observado principalmente nos compósitos com matriz do óleo da mamona, na comparação entre CCOM-070 e CCOM-175, onde o segundo apresentou um módulo de elasticidade mais elevado ( $11.42\text{GPa}$  versus  $15.64\text{GPa}$ ). Consequentemente, os compósitos com menor proporção de fibras tendem a exibir uma maior deformação antes da ruptura. Isso indica que os materiais com menos fibra são mais deformáveis e demonstram maior tenacidade.

Uma análise abrangente dos valores de resistência dos compósitos de matriz poliéster e epóxi reforçados com fibra de curauá, em comparação com compósitos semelhantes reforçados com outras fibras vegetais (Tabela 6), revela que o curauá apresenta um desempenho superior em termos de resistência à tração e rigidez. No entanto, é crucial reconhecer que essa conclusão deve ser contextualizada dentro dos parâmetros específicos de cada compósito, incluindo a proporção dos materiais, o tratamento e a forma de distribuição das fibras, bem como o método de fabricação do compósito.

Em contrapartida, quando se trata da matriz de óleo de mamona, os valores de resistência obtidos nos compósitos reforçados com fibras de curauá estão próximos aos valores apresentados na literatura para compósitos com a mesma matriz reforçados com outras fibras vegetais alinhadas, por exemplo, o sisal com  $147.55\text{MPa}$  e  $92.36\text{MPa}$  (Tabela 8). Isso pode indicar que a matriz de óleo de mamona possui propriedades intrínsecas que permitem uma boa adesão e interação com uma variedade de fibras vegetais, resultando em um desempenho relativamente uniforme nos compósitos finais.

#### **4.1.4. Propriedades estimadas para fibra de curauá**

A Tabela 15 apresenta as propriedades estimadas para a fibra de curauá. Esses valores foram determinados com base na Lei das Misturas, que considera que as propriedades dos materiais compósitos é uma combinação das características de seus constituintes. Barbero

(2017) explica que a Lei das Misturas se aplica perfeitamente aos materiais compósitos. A premissa principal para essa formulação é que a deformação na direção da fibra é a mesma na matriz e na própria fibra, implicando que a ligação fibra-matriz é perfeita.

Portanto, considerando que quando o material compósito é solicitado a fibra e a matriz se alongarão da mesma forma e conhecendo as propriedades das matrizes e dos compósitos, foi possível determinar as propriedades mecânicas de tração das fibras de curauá. As propriedades estimadas foram a resistência à tração ( $\sigma_f$ ) e o módulo de elasticidade das fibras ( $E_f$ ), obtidas de acordo com as equações 3 e 4, respectivamente.

$$\sigma_1 = V_f \cdot \sigma_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \quad \text{Equação 3}$$

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- $\sigma_1$  – Resistência à tração do compósito;
- $\sigma_f$  – Resistência à tração da fibra;
- $\sigma_m$  – Resistência à tração da matriz;
- $V_f$  – Volume de fibra;
- $V_m$  – Volume de matriz;
- $E_1$  – Módulo de elasticidade do compósito;
- $E_f$  – Módulo de elasticidade da fibra;
- $E_m$  – Módulo de elasticidade da matriz.

Tabela 15 – Propriedades estimadas para fibra de curauá.

Compósito	Resistencia a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Influência na resistência do compósito (%)
CCPO-070	333.59	43.93	277.04
CCPO-175	248.28	28.41	286.49
CCEP-070	411.15	33.92	419.43
CCEP-175	188.24	31.72	236.84
CCOM-070	461.54	33.34	2208.25
CCOM-175	276.07	32.16	1867.57

Comparando os valores estimados de tensão e módulo de elasticidade entre as diferentes resinas e para a mesma quantidade de fibra, vemos que são bem semelhantes, havendo uma pequena variação para o compósito de matriz poliéster. Enquanto que para a mesma resina, o aumento na quantidade da fibra provocou uma diminuição nas propriedades estimadas para a fibra de curauá.

Determinando os valores médios de resistência à tração e módulo de elasticidade para os compósitos com 0.070g/cm<sup>2</sup> de fibra, temos como resultado 402.09MPa e 37.06GPa, respectivamente. Enquanto que os compósitos com 0.175g/cm<sup>2</sup> de fibra apresentaram uma resistência de 237.53MPa e um módulo de elasticidade de 30.76GPa.

Podemos considerar que as médias encontradas para essas propriedades são similares aos dados da pesquisa de Neta *et al.* (2015), que determinaram uma resistência à tração de 515.24MPa ± 202.45MPa e módulo de elasticidade de 22.14GPa ± 7.10GPa. Os autores atribuíram o alto desvio padrão as características intrínsecas das fibras vegetais e classificaram o curauá como uma fibra de alto desempenho.

De fato, o curauá demonstrou ser uma fibra com boas características e de alta performance. O reforço de curauá desenvolveu um papel importante nas propriedades dos compósitos, principalmente, para o compósito com a matriz do óleo da mamona que teve um aumento considerável na resistência à tração. Esses números extremamente altos para a influência da fibra na resistência do compósito, mostra que durante o ensaio de tração esses materiais exploraram muito mais as propriedades das fibras do que das resinas para suportarem o carregamento aplicado.

## 4.2. ENSAIOS *PUSH-OUT*

Esta seção apresenta os resultados obtidos na realização dos ensaios *push-out* que serão utilizados para determinar os valores de capacidade última, deslocamento relativo e rigidez dos conectores de cisalhamento do tipo rede reforçados com fibra de curauá.

### 4.2.1. Padrões de fissuração

A Figura 44 ilustra a atuação do carregamento no bloco de concreto, bem como as forças de reação que agem nos conectores durante a realização do ensaio *push-out*. Na imagem, as linhas tracejadas representam o contorno das camadas de concreto, as setas vermelhas indicam as tiras do conector que estão sujeitas a tração e as setas azuis referem-se as tiras comprimidas.

Já as Figuras 45, 46 e 47 apresentam a aparência dos conectores do tipo rede, que foram extraídos dos blocos de concreto após o ensaio *push-out*, afim de avaliar os modos de ruptura. Da mesma forma que representado na Figura 44, os conectores estão marcados com as letras “A” e “B” para indicar o posicionamento do par de conexões dentro do bloco de concreto.

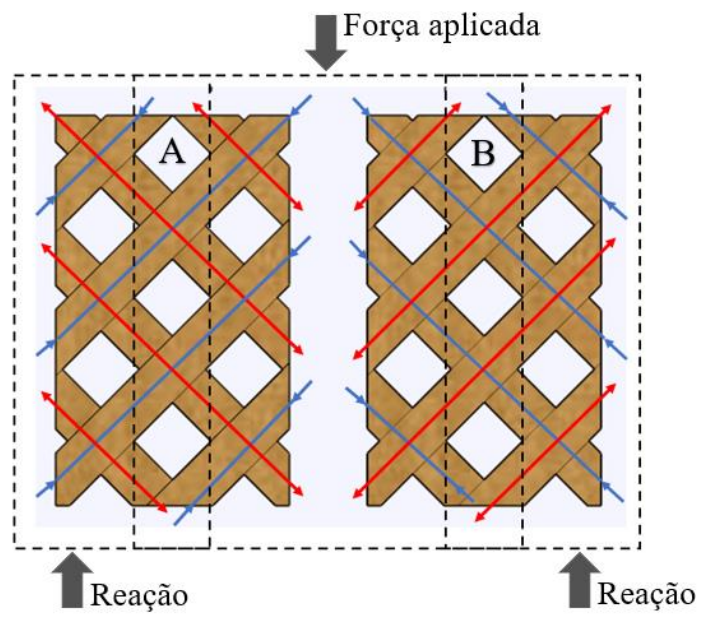


Figura 44 – Representação da atuação da carga nos conectores.



(a)



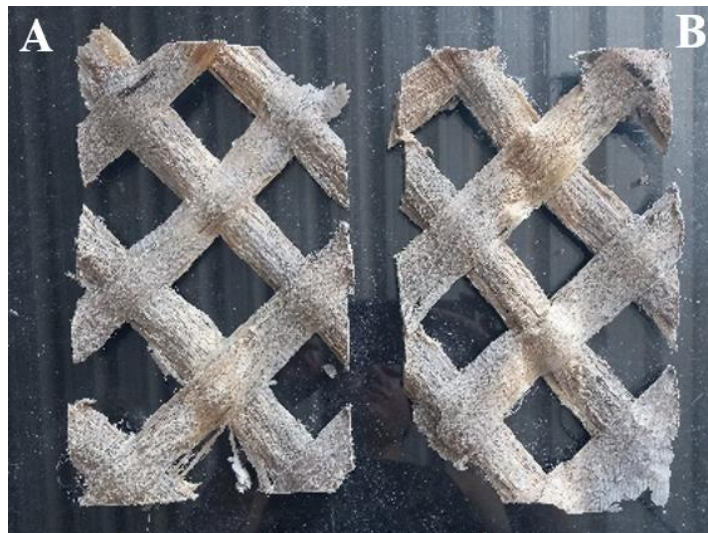
(b)





(c)

Figura 45 – Conectores de matriz poliéster extraídos dos blocos de concreto após ensaio *push-out*:  
(a) CONC-CCPO 01; (b) CONC-CCPO 02; (c) CONC-CCPO 03.



(a)



(b)





(c)

Figura 46 – Conectores de matriz epóxi extraídos dos blocos de concreto após ensaio *push-out*:  
(a) CONC-CCEP 01; (b) CONC-CCEP 02; (c) CONC-CCEP 03.



(a)



(b)



(c)

Figura 47 – Conectores de matriz poliuretana do óleo da mamona extraídos dos blocos de concreto após ensaio *push-out*: (a) CONC-CCOM 01; (b) CONC-CCOM 02; (c) CONC-CCOM 03.

É possível observar que os conectores ficaram bastante comprometidos, tendo alguns alcançado uma ruptura completa. As rupturas e a maioria dos danos ocorreram principalmente devido as forças de tração que atuam nas tiras do conector durante os testes. Mas, também se percebem danos e ondulações nas tiras sujeitas a compressão e rupturas por cisalhamento (ver Figura 45(a)).

De forma geral, os conectores apresentaram um padrão de ruptura. É notável que os danos mais significativos estão localizados na região do conector que esteve em contato com o EPS (centro do conector). Essa área apresenta uma superfície claramente diferente da região que estava embebida no concreto, nela concentraram-se a maior parte das rupturas, deformações permanentes e descolamento das fibras. Esses fatores podem ser atribuídos as propriedades elásticas do material compósito, que conseguiu acompanhar o deslocamento da camada interna de concreto e a deformabilidade do EPS durante a aplicação da carga até a ruptura. Característica semelhante aos conectores do tipo perfoFRP de Silva (2020), que relatou uma predominância das fissuras na região de contato entre o conector e a camada de isolamento.

Durante os ensaios *push-out*, na parte superior de alguns dos blocos de concreto, surgiram fissuras superficiais alinhadas com o posicionamento dos conectores (Figura 48), porém, internamente não houve o destacamento da conexão da camada de concreto. Esse fator combinado com a aparência mais lisa dessa região, indicam que o material compósito apresentou uma boa aderência a camada de concreto, pois não houveram danos superficiais nem movimentações perceptíveis.



Figura 48 – Fissuras no concreto na mesma direção dos conectores.

Outro aspecto que contribuiu para a aderência dos conectores ao concreto foi a rugosidade superficial desses elementos. A rugosidade foi adquirida através do uso de uma das camadas desmoldantes, o *peel ply*, que consiste em um tecido sintético. Durante a fabricação, o vácuo aplicado comprime todas as camadas, resultando no contato direto entre as fibras e o *peel ply* na parte superior do sistema. A resina permeia entre essas camadas, sendo inevitável que o *peel ply* transfira suas ranhuras para a camada de resina que envolve as fibras, resultando em uma superfície mais rugosa.

O próprio sistema de infusão a vácuo também exerce influência sobre os aspectos e a geometria das conexões. Isso se deve ao fato de que, sendo um sistema de produção fechado, ele não permite ajustes na configuração das fibras após o início da infusão. Em virtude disso, foi observado que a face do material voltada para cima durante o processo de infusão a vácuo também é responsável pelas variações na espessura do compósito. Essa ocorrência se deve ao fato de que a parte voltada para baixo do material entra em contato direto com uma placa de vidro, que é uma superfície plana, garantindo um acabamento superficial mais uniforme. Por outro lado, a face voltada para cima está sujeita à distribuição superficial das fibras, a qual pode variar à medida que o vácuo é aplicado no sistema.

Um ponto importante a ser destacado é quantidade de fibras soltas presentes em alguns conectores, especialmente nos blocos CONC-CCPO 02 (Figura 45(b)) e CONC-CCOM 01 (Figura 47(a)). Isso indica que a camada de resina que envolve as fibras ficou muito fina e desgastou-se facilmente durante o ensaio, fazendo com que a resistência da conexão fosse proveniente majoritariamente pelas fibras de curauá. É possível que essa seja a razão pela qual os blocos CONC-CCPO 02 e CONC-CCEP 02 conseguiram suportar cargas superiores em comparação aos demais, uma vez que a fibra constitui o elemento mais resistente do compósito.



A Figura 49 apresenta o corpo de prova de concreto ao fim do ensaio *push-out*. Todos os blocos tiveram um comportamento semelhante quanto ao deslocamento máximo, mas como citado anteriormente, houve uma variação na capacidade de carga dos blocos CONC-CCPO 02 e CONC-CCEP 02, que suportaram cerca do dobro do carregamento. Como todos os blocos foram produzidos da mesma forma e com os mesmos materiais, essa variação da carga também pode ser atribuída a pequenas variações ou inconformidades que possam ter ocorrido na fabricação dos conectores.

Os ensaios *push-out* foram conduzidos ao longo de aproximadamente 1 hora para cada bloco. Durante a aplicação de carga a uma taxa de deslocamento de 0.1 mm/min até alcançar um deslocamento relativo de 4 mm, não foram observadas quaisquer modificações nos corpos de prova. No entanto, ao aumentar a taxa de deslocamento para 0.5 mm/min, intervalo de deslocamento relativo entre 4 mm e 30 mm, tornou-se evidente o deslocamento das camadas de concreto. Adicionalmente, constatou-se a presença de ruídos contínuos, semelhantes a pequenos estalos, os quais podem estar relacionados a separação do EPS da camada de concreto ou à ocorrência de fraturas no próprio concreto.



Figure 49 – Espécime do painel sanduíche após ensaio *push-out*.

Nota-se que houve grandes deslocamentos da camada interna de concreto, característica presente em todos os blocos ensaiados, e que confirma a ocorrência do cisalhamento das conexões. Mas mesmo com grandes deslocamentos, não houve a fragmentação das camadas de concreto, apenas desprendimentos pontuais da camada de EPS.

Esse desprendimento da camada isolante é um comportamento similar aos relatados em outras pesquisas. Por exemplo, Woltman *et. al.* (2010) classificaram a ligação entre as camadas de concreto e EPS como frágil e ainda apontaram que sua falha é alcançada após o corpo de prova ensaiado atingir um deslocamento de apenas 2mm ou 3mm. Os autores também destacam

que após atingir esse ponto, o carregamento é transferido totalmente para os conectores de cisalhamento.

#### 4.2.2. Carregamento × deslocamento relativo

A Figura 50 apresenta as curvas de força aplicada × deslocamento relativo para os conectores de cisalhamento correspondente aos três tipos de resinas utilizada na fabricação dos compósitos. É importante lembrar que a força representada nos gráficos se refere a capacidade de carga dos conectores, determinada dividindo a carga máxima do ensaio *push-out* por dois. E o deslocamento compreende a média dos valores aferidos pelos dois LVDT's posicionados dos dois lados da camada interna de concreto.

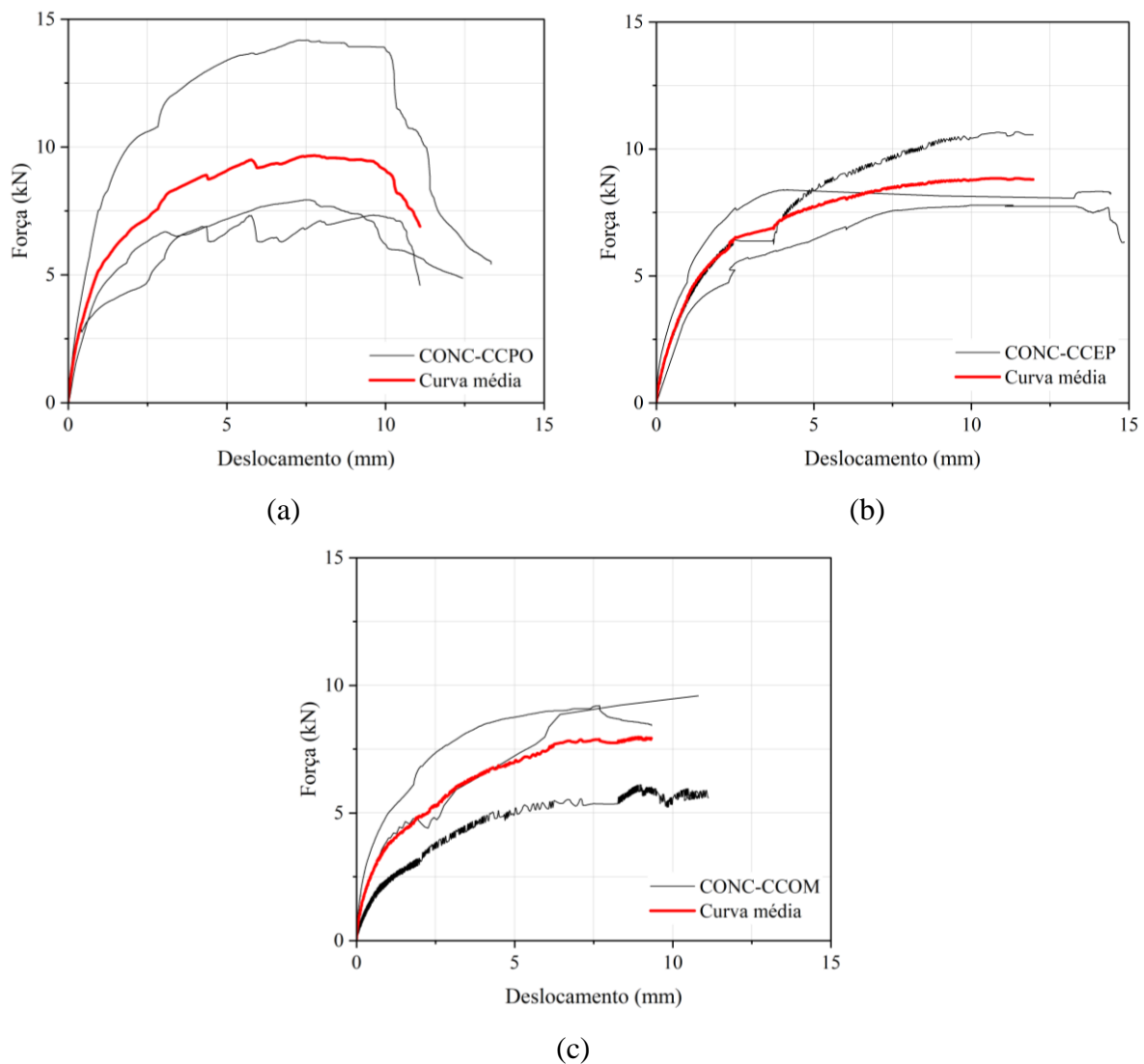


Figura 50 – Curvas força × deslocamento: (a) CONC-CCPO; (b) CONC-CCEP; (c) CONC-CCOM.

Com base nas curvas, observamos que realmente todos os espécimes apresentaram um comportamento semelhante durante os ensaios *push-out*. As curvas exibem um padrão consistente, com um aumento gradual da carga aplicada, seguido por um patamar distintamente definido de alongamento, onde o deslocamento continua a aumentar até a ruptura. No caso do bloco CONC-CCPO (Figura 50(a)), é importante observar uma particularidade: uma das curvas se destaca das demais devido à maior capacidade de carga suportada. No entanto, o padrão de desenvolvimento da curva também é semelhante ao das outras curvas.

Esse padrão apresentado pelas curvas obtidas nos ensaios *push-out* está em consonância com as observações de Woltman *et. al.* (2010), mencionadas anteriormente. Verificamos que ao atingirem o deslocamento de aproximadamente 2mm ou 3mm, ocorre uma mudança no carregamento, ponto onde supostamente as cargas estão sendo resistidas pelas camadas de concreto e EPS. Porém, neste caso, as alterações no carregamento aplicado ocorrem de forma moderada, ao contrário da pesquisa de Woltman *et. al.* (2010), na qual é observada uma queda abrupta na capacidade de carga.

Outro aspecto relevante a ser destacado é a similaridade das curvas de força  $\times$  deslocamento obtidas neste estudo com a curva do corpo de prova sem conector (SP-EPS) utilizado por Silva (2020) como referência (ver Figura 18). Conforme descrito na seção 2.2, Silva (2020) registrou um carregamento máximo de aproximadamente 3.2kN com um deslocamento próximo a 10mm. Entretanto, neste estudo, observou-se que a carga máxima variou de 14.68kN a 28.35kN para os compósitos produzidos utilizando os três tipos de resina. Comparando esses valores de carga máxima, podemos concluir que a implementação dos conectores de cisalhamento do tipo rede reforçado com fibra de curauá é capaz de oferecer um aumento de 4 a 8 vezes na resistência do bloco de concreto que representa o sistema de painel sanduíche.

#### **4.2.3. Rigidez dos conectores**

A Tabela 16 apresenta a rigidez dos conectores de cada grupo de resina, determinada através da razão entre a média do carregamento máximo e o deslocamento médio de cada bloco de concreto.

Tabela 16 – Rigidez dos conectores de cisalhamento.

Corpo de prova	Força máxima (kN)			Deslocamento corresponde a força máxima (mm)			Rigidez (kN/mm)		
	Valor	Média	CoV (%)	Valor	Média	CoV (%)	Valor	Média	CoV (%)
CONC-CCPO 01	7.93			12.44			0.64		
CONC-CCPO 02	14.18	9.81	0.39	13.33	12.29	0.09	1.06	0.79	0.30
CONC-CCPO 03	7.34			11.09			0.66		
CONC-CCEP 01	7.79			14.04			0.55		
CONC-CCEP 02	13.60	9.93	0.32	14.08	14.18	0.01	0.97	0.70	0.33
CONC-CCEP 03	8.39			14.42			0.58		
CONC-CCOM 01	9.22			9.32			0.99		
CONC-CCOM 02	10.68	8.67	0.27	11.00	10.48	0.10	0.97	0.84	0.30
CONC-CCOM 03	6.12			11.13			0.55		

Ao analisar os valores médios, observamos resultados semelhantes em todas as propriedades para os três grupos de resinas examinadas. Isso reforça o papel da fibra de curauá no compósito com a matriz de poliuretano do óleo da mamona, que inicialmente apresentava propriedades mecânicas inferiores em comparação com as resinas sintéticas estudadas. No entanto, resultou em produtos que exibiram características comparáveis aos compósitos com matrizes sintéticas.

Dado que ainda não há estudos na literatura que abordem especificamente conectores de cisalhamento com a geometria proposta reforçados com fibra de curauá, as análises serão realizadas com base em conectores de cisalhamento com aplicações semelhantes. Por exemplo, Kim e You (2015) analisaram painéis sanduíche de concreto reforçados com conectores do tipo rede de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP). Os testes foram realizados em um painel com 3.60m de largura e 1.20m de altura, onde foram implantados de 1 a 4 conectores com 1.10m de comprimento. Os autores obtiveram como resultados carregamentos máximos que variaram de 72kN a 84kN e rigidezes entre 0.23kN/m e 0.32kN/m.

Outro exemplo é a pesquisa de Silva (2020) que trabalhou com conectores do tipo perfoFRP reforçado com fibra de vidro para painel sanduíche e obteve valores médios de deslocamento e rigidez de 1.28mm e 26.38kN/mm, respectivamente, correspondentes ao carregamento máximo de 32.23kN. Também para mesma aplicação, os conectores do tipo perfoFRP reforçados com fibra de curauá de Araújo (2023) chegaram a 5.16mm de deslocamento e 5.54kN/mm de rigidez, para uma carga de 22.50kN. Isso mostra que, para a mesma aplicação, o conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá alcançou valores de carga, deslocamento e rigidez divergentes aos encontrados na literatura.

Existem alguns fatores que podem ter influência direta no comportamento do conector, fazendo com que este elemento não alcance o carregamento inicial para o qual foi

dimensionado, bem como valores próximos aos disponíveis na literatura. Vale ressaltar que a escolha de utilizar fibra natural implica em diferenças fundamentais em relação ao compósito com fibra sintética, que serviu como base para o valor de 32kN. É de se esperar que a fibra natural alcance um valor inferior, porém, a proximidade com essa referência é um aspecto relevante. Dentre outros fatores, temos:

- **Discrepância na seção transversal:** uma das principais fontes de divergência entre os valores experimentais e o pré dimensionamento reside na dificuldade de manter a exatidão das dimensões das tiras do conector durante o processo de fabricação manual. A variação na largura e espessura das tiras afeta diretamente a área da seção transversal e, conseqüentemente, a capacidade de carga do conector;
- **Formato do conector:** o modelo em rede adotado para o conector pode não ser o mais apropriado para a produção dos conectores com fibra natural e aplicando a infusão a vácuo. Talvez, a utilização de chapas perfuradas poderia proporcionar uma distribuição mais uniforme das fibras e otimizar as propriedades mecânicas do componente, além de facilitar a manutenção da geometria correta durante o processo de produção;
- **Processo de infusão à vácuo:** a infusão a vácuo é um passo crítico na produção de conectores com fibra vegetal. A porosidade característica do material vegetal exige que o processo seja conduzido de maneira mais lenta para assegurar uma impregnação eficaz da resina. A velocidade de infusão influencia diretamente na integridade estrutural do conector.

Porém, para uma comparação mais ideal, é necessário submeter a conexão a condições de projeto. Por exemplo, determinar a quantidade necessária de conectores de cisalhamento do tipo rede reforçado com fibra de curauá para suportar a carga total de um painel sanduíche. Supondo que o painel em questão possui 8 metros de comprimento, 3 metros de altura, camadas de concreto com 5cm de espessura e está suspenso por uma dessas camadas, enquanto a outra é sustentada pelos conectores.

Neste caso, o primeiro passo é determinar o valor característico para a resistência dos conectores do tipo rede. O valor característico da resistência ( $f_{cc}$ ) é calculado com base na média aritmética dos valores de carga obtidos no ensaio *push-out* ( $f_{cm}$ ) e o desvio padrão desses dados ( $s$ ), como mostra a equação 5.

$$f_{cc} = f_{cm} - 1.65*s$$

Equação 5



Depois, utiliza-se as equações 6 e 7 para determinar o peso da camada de concreto sustentada pelos conectores e a quantidade necessária de conectores, em metro linear, para suportar o peso dessa camada suspensa, respectivamente. Vale ressaltar que nessas equações são utilizados fatores de segurança de 1.4 para a resistência dos conectores ( $\gamma_a$ ) e 1.5 para a carga de cálculo ( $\gamma_c$ ).

$$P_c = c \times h \times e \times \rho \times \gamma_c \quad \text{Equação 6}$$

$$Q_m = \frac{P_c \times \gamma_a \times l}{f_{cc}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- $P_c$  - peso da camada de concreto suspensa (kN);
- $c$  - comprimento da camada de concreto suspensa (m);
- $h$  - altura da camada de concreto suspensa (m);
- $e$  - espessura da camada de concreto suspensa (m);
- $\rho$  - peso específico do concreto armado (kN/m<sup>3</sup>);
- $\gamma_c$  - fator de segurança da carga;
- $f_{cc}$  - resistência característica do conector (kN);
- $l$  - altura do conector (m);
- $\gamma_a$  - fator de segurança do conector.

Com isso, para o peso da camada de concreto suspensa que depende somente das dimensões do painel e do peso específico do concreto armado, foi encontrado um valor de  $P_c$  igual a 45kN. Já para o  $Q_m$ , que representa a quantidade linear em metros de conector necessária para suportar o painel suspenso, foram obtidos os valores de 4.42m para o conector de matriz poliéster, 3.38m para o conector de matriz epóxi e 3.26m para a resina poliuretana do óleo da mamona.

Esse resultado é surpreendente, pois mostra que dentre os conectores analisados aqueles provenientes da matriz vegetal do óleo da mamona requerem a menor quantidade em metros linear de conexões. Isso ocorre devido a consistência dos dados obtidos nos ensaios *push-out*, que resultaram no grupo com menor desvio padrão, conseqüentemente, maior valor característico de resistência e menor quantidade de conectores.

Ainda, é possível determinar a quantidade de conectores perfoFRP para suportar a mesma carga de cálculo de 45kN. Os dados individuais dos ensaios *push-out* do grupo SP-12.70-1.75 de Silva (2020), mostram que foram alcançadas cargas de 30.38kN, 34.08kN, 26.63kN e do grupo ESC-GN1 de Araújo (2023), resistências de 23.66kN, 19.86kN e 19.86kN. Fazendo

uma análise sob as mesmas condições, obtém-se um  $Q_m$  de 0.65 metros para os conectores perfoFRP reforçados com fibra de vidro de Silva (2020) e um  $Q_m$  de 0.90 metros para os conectores perfoFRP reforçados com fibra de curauá de Araújo (2023).

Podemos observar que, para a mesma aplicação, o uso de uma geometria diferente (perfoFRP) ou o uso de um reforço sintético (fibra de vidro) possibilita a utilização de uma quantidade linear de conectores significativamente menor em comparação com o conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá. Por outro lado, embora não atinja a carga para a qual foi dimensionado, é viável utilizar o conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá como conexão para um painel sanduíche, sendo necessária apenas a aplicação de uma quantidade maior de conectores para compensar as forças solicitantes do painel.

Adicionalmente, quando se considera a capacidade de carga das conexões para os três diferentes tipos de compósitos analisados, observa-se que o conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá apresenta um desempenho superior em comparação a alguns dos conectores comerciais avaliados por Naito (2012) (conforme Tabela 2). A título de exemplo, os conectores denominados C e F, que correspondem a pinos de PFRV e exibem cargas máximas de 4.62kN e 3.23kN, respectivamente. Além disso, os conectores identificados como F, constituídos de barras cruzadas de PRFB com resistência de 7.29kN, o conector H-1, um clipe em formato "C" de aço galvanizado com resistência de 3.59kN, e o conector H-2, um clipe em formato "C" de aço inoxidável com resistência de 5.52kN, também apresentam desempenhos inferiores. Os conectores produzidos com os compósitos CCPO e CCEP ainda apresentaram carregamento superior ao conector K, do tipo treliça única triangular de aço galvanizado, com resistência de 9.13kN. Isso solidifica a concepção de que o conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá, abordado neste estudo, tem o potencial de ser uma alternativa viável para aplicações comerciais, uma vez que apresenta um desempenho comparável aos conectores já disponíveis no mercado.

Em resumo, os resultados indicam uma viabilidade promissora para o uso dos conectores de cisalhamento do tipo rede reforçados com fibra de curauá em aplicações de painéis sanduíche. Isso se aplica não apenas aos compósitos produzidos com matrizes sintéticas, mas também ao conector fabricado com a matriz poliuretana do óleo da mamona. Contudo, é fundamental destacar a importância de considerar cenários de projeto específicos para uma avaliação mais precisa do desempenho desses materiais.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo dessa pesquisa foi determinar o comportamento de conectores do tipo rede de compósito polimérico reforçado com fibra de curauá sujeitos ao cisalhamento através da realização de ensaios *push-out*. Para isso, foi necessário determinar as propriedades mecânicas de tração das matrizes utilizadas na fabricação dos compósitos, bem como o comportamento do próprio compósito.

Em resposta aos objetivos estabelecidos, as conclusões destacam os principais resultados obtidos e suas contribuições para a área de aplicação de materiais de origem vegetal como conexões de cisalhamento para painel sanduíche. Logo, as principais conclusões alcançadas nessa pesquisa encontram-se listadas a seguir:

- A microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrou que o tratamento alcalino das fibras de curauá com hidróxido de sódio (NaOH) e água destilada em uma concentração de 5% (m/v), provocou a desfibrilação e o aumento da rugosidade superficial, melhorando a aderência entre a fibra e a matriz;
- A resina poliuretana do óleo da mamona mostrou-se ser um material com alongamento muito elevado, tanto que não foi possível medir sua deformação até a ruptura;
- O aumento na quantidade de fibra de 0.070g/cm<sup>2</sup> para 0.175g/cm<sup>2</sup> não resultou necessariamente em um aumento na capacidade de carga dos compósitos;
- O uso da fibra de curauá como material de reforço gerou maior impacto na matriz poliuretana do óleo da mamona, pois aumentou a resistência a tração em aproximadamente 20×, considerando a resina pura, de forma que seus compósitos atingiram um desempenho similar aos compósitos de matrizes sintética;
- Os padrões de fissuração mostraram que a maioria dos danos ocorreram devido as forças de tração que atuaram nas tiras do conector durante os ensaios *push-out*;
- Os danos mais significativos estão localizados na região do conector que fica em contato direto com a camada isolante de EPS;
- O uso dos conectores de cisalhamento do tipo rede reforçado com fibra de curauá pode resultar em um aumento de 4 a 8 vezes na resistência do bloco de concreto;
- A aplicação do conector do tipo rede reforçado com fibra de curauá em painel sanduíche é viável desde que seja empregada uma quantidade maior de conectores para compensar as forças solicitantes do painel.

Apesar dos resultados significativos, algumas limitações devem ser mencionadas e consideradas na interpretação da pesquisa. O primeiro ponto a ser destacado é a dificuldade em trabalhar com uma fibra de origem vegetal. É muito importante o estudo e a implementação de materiais naturais em elementos estruturais para a construção civil. Porém, para serem utilizados esses materiais precisam ser preparados, geralmente, é utilizado tratamentos químicos para aprimorar suas características.

É possível encontrar diversas pesquisas que analisaram a eficiência de diferentes tratamentos em fibras vegetais, o que facilita a escolha do tratamento. Mas, ainda assim, realizar o tratamento na fibra é bastante desgastante e demanda muito tempo de trabalho. A dificuldade em preparar a fibra vegetal, às vezes, pode limitar até a gramatura desejada para o compósito, pois é preciso tratar uma quantidade de fibra muito superior ao que realmente será utilizado.

As limitações encontradas para as matrizes utilizadas na pesquisa também estão relacionadas com o custo dos materiais e sua disponibilidade no mercado, principalmente, por se tratar de resinas que devem ser compatíveis com o processo de infusão à vácuo. Tratando especificamente da resina poliuretana derivada do óleo da mamona, é importante ressaltar que essa resina possui um tempo de cura muito longo que resultou no atraso de alguns processos. Enquanto as matrizes sintéticas possuem um tempo de cura de 24 horas e após esse período é possível desmoldar e trabalhar com os compósitos, para a resina do óleo da mamona algumas vezes pode ser necessário aguardar um período de até 72 horas.

Em relação ao processo de infusão à vácuo utilizado para produção dos compósitos, esse é um método de trabalho muito complexo. A montagem do sistema requer muita atenção e deve ser feita de forma minuciosa para que não haja vazamentos, conseqüentemente, a perda de pressão. Após a montagem e execução do sistema não é possível fazer ajustes nos elementos, logo, se a peça fabricada não atender aos requisitos esperados é preciso realizar todo o processo de infusão novamente.

Consideradas essas limitações, sugere-se que futuros trabalhos abordem outras propriedades para os materiais compósitos com fibra e matriz de origem vegetal, como resistência à flexão, resistência ao impacto e condutividade térmica. Também é interessante analisar a aplicação de outras fibras vegetais, como o sisal, juta e coco, em conectores de cisalhamento do tipo rede. É importante que os estudos dos materiais vegetais para essa aplicação sejam aprimorados para tentar alcançar geometrias semelhantes aos conectores do tipo rede constituídos por fibras sintéticas.

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Analysis and performance of fiber composites**. 3 ed. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 576 p., 2017.
- ARAÚJO, W. B. D. **Comportamento experimental de conectores de cisalhamento do tipo PerfoFRP reforçados com fibra de curauá**. Universidade de Brasília. [S.l.], p. 96 p. 2023.
- ASTM. **ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. [S.l.], p. 1-13. 2000.
- ASTM. **ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. [S.l.], p. 1-17. 2014.
- AZEVEDO, A. R. G. D. *et al.* Investigation of the Potential Use of Curauá Fiber for Reinforcing Mortars. **Fibers**, 2020. 1-13.
- AZEVEDO, M. P. **Estudo do comportamento de painéis sanduíche com conectores em GFRP: ensaios em escala real**. Universidade do Minho. Braga, p. 219. 2013. Dissertação de mestrado.
- BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design**. 3ª. ed. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- BARROS, M. A. L.; RAMOS, G. A. Mamona. **EMBRAPA BR**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/pre-producao/socioeconomia/estatisticas>. Acesso em: 11 agosto 2023.
- BELTRAMI, L. V. R.; SCIENZA, L. C.; ZATTERA, A. J. Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Curauá sobre as Propriedades de Compósitos de Matriz Biodegradável. **Polímeros**, 2014. 388-394.
- BERTINI, A. A. **Estruturas tipo sanduíche com placas de argamassa projetada**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, p. 221. 2002.
- CARDOSO, M. G. **Dosagem de Concretos Autoadensáveis Reforçados com Fibras pelo Método do Empacotamento Compressível**. Universidade de Brasília. [S.l.]. 2020.
- CAVALCANTI, D. *et al.* Comparative analysis of the mechanical and thermal properties of polyester and epoxy natural fibre-reinforced hybrid composites. **Journal of Composites Materials**, 2020. 1-10.
- CHAKRABORTY, I.; CHATTERJEE, K. Polymers and Composites Derived from Castor Oil as Sustainable Materials and Degradable Biomaterials: Current Status and Emerging Trends. **Biomacromolecules**, 2020. 1-24.
- CHAND, N.; FAHIM, M. **Trilogy of natural fiber polymer composites**. 2ª. ed. Kidlington: Woodhead Publishing, 2021.
- CHENG, Z. *et al.* Aramid fiber with excellent interfacial properties suitable for resin composite in a wide polarity range. **Chemical engineering journal**, 2018. v. 347, p. 483-492.

DHAND, V. *et al.* A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. **Composites: Part B**, 2015. v. 73, p. 166-180.

DIAB, H.; WU, Z. Nonlinear constitutive model form time-dependent behavior of FRP concrete interface. **Composites science and technology**, 2007. v. 67, n. 11-12, p. 2323-2333.

EINEA, A. *et al.* State-of-the-Art of Precast Concrete Sandwich Panels. **PCI Journal**, Omaha, 1991. p. 78-98.

EINEA, A. *et al.* A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system. **PCI JOURNAL**, 1994. p. 90-101.

EUROCODE. **EN 1994-1-1 - Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. [S.l.], p. 121. 2004.

FAN, M.; YU, J. Polymer nanocomposites: processing, characterization and properties. **Taylor & Francis Group**, 2008.

FARIA, D. L. *et al.* Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibres. **Journal of Polymer Research**, 2020. 1-13.

FRANKL, B. A. *et al.* Behavior of precast, prestressed concrete sandwich wall panels reinforced with CFRP shear grid. **PCI Journal**, 2011. p. 42-54.

FRANKL, B. A. **Structural behavior of insulated precast prestressed concrete sandwich panels reinforced with CFRPG**. North Carolina State University. Raleigh, p. 243 f. 2008.

GANGIL, B. *et al.* Natural and synthetic fibers for hybrid composites. **Hybrid fiber composites: materials, manufacturing, process engineering**, 2020. p. 1-15.

GIRISHA, C.; SANJEEVAMURTHY; RANGASRINIVAS, G. Tensile properties of natural fiber reinforced epoxy-hybrid composites. **International journal of modern engineering research**, 2012. p. 471-474.

GLEICH, H. New carbon fiber reinforcement advances sandwich wall panels. **Structure Magazine**, 2007. p. 61-63.

HASSAN, T. K.; RIZKALLA, S. H. Analysis and design guidelines of precast, prestressed concrete, composite load-bearing sandwich wall panels reinforced with CFRP grid. **PCI JOURNAL**, 2010. v. 55, n 2, p. 147-162.

HEMANTH, R. D. *et al.* EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF E-GLASS AND COCONUT FIBER REINFORCED WITH POLYESTER AND EPOXY RESIN MATRICES. **International Journal of Mechanical and Production**, 2017. 13-20.

HSISSOU, R. *et al.* Polymer composite materials: a comprehensive review. **Composite Structures**, 2021. v. 262, n. 113640, p. 1-15.

HUANG, J. Q.; DAI, J. G. Direct shear tests of glass fiber reinforced polymer connectors for use in precast concrete sandwich panels. **Composite structures**, 2019. 136-147.

KICK, T.; GRETHE, T.; MAHLTIG, B. A Natural Based Method for Hydrophobic Treatment of Natural Fiber Material. **Acta Chim**, 2017. 373-380.

KIM, J.; YOU, Y.-C. Composite behavior of a novel insulated concrete sandwich wall panel reinforced with GFRP shear grids: effects of insulation types. **Materials**, 3 março 2015. 899-913.

LAMEIRAS, R. *et al.* Seismic behaviour of precast sandwich wall panels of steel fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. **Engineering Structures** , 2021.

LAMEIRAS, R. D. M. *et al.* Desenvolvimento de painéis sadúche estruturais constituídos por camadas nervuradas de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço e conectores de compósito polimérico reforçado com fibra de vidro. **Encontro Nacional Betão Estrutural - Be2012**, Porto, 2012. p. 1-10.

LAMEIRAS, R. D. M. **Sandwich structural panels comprising thinwalled SFRSCC and GFRP connectors: from material features**. Universidade do Minho. Braga, p. 446. 2016. Tese de doutorado.

LAPENA, M. H.; MARINUCCI, G. Mechanical characterization of basalt and glass fiber epoxy composite tube. **Material research**, 2017. v. 21, n. 1, p. 1-7.

LIU, J. *et al.* Recent development on bio-based thermosetting resins. **Journal of Polymer Science**, 2021. 1474-1490.

MA, Y. *et al.* Castor oil as a platform for preparing bio-based chemicals and polymer materials. **Green Materials**, 2022. 99-109.

MACIEL, N. D. O. R. *et al.* Comparative tensile strength analysis between epoxy composites reinforced with curaua fiber and glass fiber. **Journal of Materials Research and Technology**, 2018. v. 7, n. 4, p. 561-565.

MALLICK, P. K. **Processing of polymer matrix composites**. 1ª. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2017.

MCCALL, W. C. Thermal properties of sandwich panels. **Concrete International**, Janeiro 1985. p. 35 - 41.

MILANESE, A. C. **CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZES POLIMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL E DE VIDRO**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Guaratinguetá, p. 131. 2008.

MILANI, M. Mamona. **EMBRAPA BR**, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/mamona/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-planta>. Acesso em: 11 agosto 2023.

MOHAMAD, N.; MAHDI, M. H. Testing of Precast Lightweight Foamed Concrete Sandwich Panel With Single and Double Symmetrical Shear Truss Connectors Under Eccentric Loading. **Advanced Materials Research**, 2011. 1107-1116.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. **Natural fibers biopolymers and biocomposites**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, v. 852 p, 2005.

MONTEIRO, S. N. *et al.* Processing and properties of continuous and aligned curauá fibers incorporated polyester composites. **Journal of materials research and technology**, 2013. v. 2, n. 1, p. 2-9.

NAFADI, M. K. *et al.* Long-term behavior of precast, prestressed concrete sandwich panels reinforced with carbon-fiber-reinforced polymer shear grid. **PCI Journal**, 2021. v. 66, n. 5, p. 23-38.

NAIR, A. B.; JOSEPH, R. Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements. **Chemistry, Manufacture and applications of natural rubber**, 2014. p. 249-283.

NAITO, C. J. *et al.* Performance and characterization of shear ties for use in insulated precast concrete sandwich wall panels. **ASCE Journal of Structural engineering**, 2012. v. 138, n 1, p. 52-61.

NETA, L. S. L. *et al.* Caracterização físico-química de fibras de curauá e sua aplicação em compósitos poliméricos. **Scientia Amazonia**, 2015. 21-27.

NEVES, A. C. C. *et al.* Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. **Journal of Materials Research and Technology**, 2020. 1296-1304.

O'HEGARTY, R.; KINNANE, O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations. **Construction and Building Materials**, 2020.

OGUNNIYI, D. S. Castor oil: A vital industrial raw material. **Bioresource Technology**, 2006. 1086–1091.

OLSEN, J. T. **Developing a General Methodology for Evaluating Composite Action in Insulated Wall Panels**. Utah State University. [S.l.], p. 209 f. 2017. (<https://doi.org/10.26076/50b2-d37b>).

PCI, C. R. **State of the art of precast/prestressed concrete sandwich wall panels**. PCI JOURNAL. Chicago, p. 63. 2011. (2 V).

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance. **Composites: Part A: Applied science and manufacturing** , 2016. v. 83, p. 98-112.



RAHMAN, R.; PUTRA, S. Z. F. S. Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites. **Mechanical and physical testing of biocomposites, fiber reinforced composites and hybrid composites**, 2019. p. 81-102.

RAJAK, D. K. *et al.* Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties and applications. **Polymers**, 2019. v. 11, n. 10, p. 1667.

RAMDANI, N. **Polymer and Ceramic Composite Materials: Emergent Properties and applications**. [S.l.]: CRC PRESS, 2019.

SALGADO, I. D. P.; SILVA, F. D. A. Flexural behavior of sandwich panels combining curauá fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core. **Construction and Building Materials**, 2021. v. 286, p 122890.

SALMON, D. C. *et al.* Full scale testing of precast concrete sandwich panels. **ACI STRUCTURAL JOURNAL**, 1997. p. 354-362.

SANJAY, M. R. *et al.* Characterization and properties of natural fiber polymer composites: a comprehensive review. **Journal of cleaner production**, 2018. v. 172, p. 566-581.

SATHISHKUMAR, T.; NAVEEN, J.; SATHEESHKUMAR, S. Hybrid fiber reinforced polymer composites - a review. **Journal of reinforced plastics and composites**, 2014. v. 33, n. 5, p. 454-471.

SENA, J. C. D. A. **Cultivo do Curauá**. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Pará - EMATER. PARÁ, p. 24. 2023.

SENTHAMARAIKANNAN, P.; KATHIRESAN, M. Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fiber from *Coccinia grandis*.L. **Carbohydrate Polymers**, 2018. 332–343.

SHOJAEI, A.; KHASRAGHI, S. S. Self-healing and self-sensing smart polymer composites. **Composite materials**, 2021. p. 307-357.

SILVA, J. K. F. **Avaliação experimental sobre o comportamento mecânico de conectores de cisalhamento do tipo perfofrp**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 99 f. 2020. Dissertação de mestrado.

SILVA, R. C. D. **Cadeia produtiva do Curauá: concepção sistêmica dos condicionantes de seu desempenho na região Oeste Paraense**. Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, p. 222. 2011.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua Fiber: A New Alternative to Polymeric Composites. **Journal of Reinforced plastics and composites**, 2008. 103-112.

SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, p. 192. 2001.

- SOLTAN, D. *et al.* Introducing a curauá fiber reinforced cement-based composite with strain-hardening behavior. **Industrial Crops and Products**, 2017. v. 103, p. 1-12.
- SOPAL, G. J. **Use of CFRP grid as shear transfer mechanism for precast concrete sandwich wall panels**. North Carolina State University. Raleigh, p. 209 f. 2013. Tese de doutorado.
- SOUSA, L. K. D. **Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina poliuretana a base do óleo da mamona e fibras de rami, sisal e bucha vegetal**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 98. 2013.
- TEIXEIRA, L. A.; JUNIOR, L. V. D.; LUZ, S. M. Chemical treatment of curaua fibres and its effect on the mechanical performance of fibre/polyester composites. **Plastics, Rubber and Composites**, 2020. 1-12.
- TEIXEIRA, R. S. *et al.* Impact of content and length of curauá fibers on mechanical behavior of extruded cementitious composites: Analysis of variance. **Cement and Concrete Composites**, setembro 2019. 134-144.
- TOMLINSON, D. G.; TEIXEIRA, N.; FAM, A. New shear connector design for insulated concrete sandwich panels using basalt fiber-reinforced polymer bars. **Journal of Composites for Construction**, 2016. p. 1-13.
- WANG, R.-M.; ZHENG, S.-R.; ZHENG, Y.-P. **Polymer matrix composites and technology**. 1ª. ed. Beijing: Science press limited, 2011.
- WESTMAN, M. P. *et al.* **Natural fiber composites: a review**. PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY. [S.l.], p. 10 p. 2010.
- WOLTMAN, G. D.; TOMLINSON, D. G.; FAM, A. A Comparative Study of Various FRP Shear Connectors for Sandwich Concrete Walls. **The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering**, Beijing, 2010. 27-29.
- YANG, X. *et al.* Experimental Study of Structural Performance of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Cruciform Cross Section GFRP Connectors. **MATEC Web of Conferences - ICBMM**, 2019. 1-7.
- ZUKOWSKI, B.; SILVA, F. D. A.; FILHO, R. D. T. Design of strain hardening cement-based composites with alkali treated natural curauá fiber. **Cement and concrete composites**, 2018. v. 89, p. 150-159.