

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS  
ALVEOLARES PROTENDIDAS DE AÇO-CONCRETO (ViMAP)**

**BRENDA VIEIRA COSTA FONTES**

TESE DE DOUTORADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS**  
**ALVEOLARES PROTENDIDAS DE AÇO-CONCRETO (ViMAP)**

**BRENDA VIEIRA COSTA FONTES**

**ORIENTADOR: PROF. WILLIAM TAYLOR MATIAS SILVA, Dr. Ing.**

**COORIENTADOR: PROF. LUCIANO MENDES BEZERRA, PhD.**

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: ABRIL - 2025**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS  
ALVEOLARES PROTENDIDAS DE AÇO-CONCRETO (ViMAP)**

**BRENDA VIEIRA COSTA FONTES**

**TESE SUBMETIDA 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 DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO  
CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing. (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD. (ENC-UnB)  
(Coorientador)**

---

**Prof. Jorge Douglas Bonilla Rocha, Dr. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno 1)**

---

**Prof. Ramon Saleno Yure Rubim Costa Silva, Dr. (ENC-UnB)  
(Examinador Interno 2)**

---

**Prof. Cleirton André Silva de Freitas, Dr. (UFCA)  
(Examinador Externo 1)**

---

**Prof. Marcos Aurélio Marques Noronha, Dr. (UFSC)  
(Examinador Externo 2)**

**BRASÍLIA/DF, 30 DE ABRIL DE 2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FONTES, BRENDA VIEIRA COSTA	
Estudo do comportamento estrutural de vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAP) [Distrito Federal] 2025.	
xxxiii, 291p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Estruturas e Construção Civil, 2025).	
Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Vigas Mistas Alveolares	2. Protensão
3. Análise Numérica	4. ABAQUS/CAE
I. ENC/FT/UNB	II. Título (Doutor)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FONTES, B. V. C. (2025). Estudo do comportamento estrutural de vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAP). Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação XX, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental de Brasília, DF, 291 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Brenda Vieira Costa Fontes.

TÍTULO: Estudo do comportamento estrutural de vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAP).

GRAU: Doutor

ANO:2025

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente aos meus orientadores, Professor William Taylor Matias Silva e Professor Luciano Mendes Bezerra, pela paciência e dedicação ao longo desses anos de trabalho árduo. Sua orientação foi essencial para a realização desta tese. Expresso também minha gratidão ao Professor Jorge Bonilla pelos valiosos comentários e observações precisas no desenvolvimento do modelo numérico.

Aos meus pais, Ana Maria e João Batista, pelo constante apoio e incentivo desde a minha infância, proporcionaram a base para todas as minhas conquistas. Eu devo tudo a vocês, não tenho palavras para descrever o quanto sou grata por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim. OBRIGADA!

Ao meu parceiro, Max Assunção Filho, meu companheiro incansável, que esteve ao meu lado nos finais de semana de trabalho intenso, compartilhando cada momento, oferecendo carinho, compreensão e palavras de incentivo quando eu mais precisava. Sua presença tornou essa jornada mais leve e especial.

Por fim, agradeço aos meus amigos e familiares, que, mesmo sem compreenderem plenamente a complexidade da minha pesquisa, nunca deixaram de me apoiar e torcer pelo meu sucesso.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, que  
me ensinaram que educação e caráter são  
as coisas que realmente importam.

## **RESUMO**

### **ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS MISTAS ALVEOLARES PROTENDIDAS DE AÇO-CONCRETO (ViMAP)**

**Autor:** Brenda Vieira Costa Fontes

**Orientador:** William Taylor Matias Silva, Dr. Ing.

**Coorientador:** Luciano Mendes Bezerra

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, abril de 2025**

Esta tese apresenta um estudo do comportamento estrutural de vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAP), com ênfase na avaliação numérica de diferentes configurações geométricas, dimensões dos alvéolos, presença de protensão e disposição de desviadores. As vigas foram modeladas em três dimensões por meio do método dos elementos finitos, utilizando o software ABAQUS/CAE, considerando materiais com propriedades reais e interações complexas entre aço, concreto e conectores de cisalhamento. As análises envolveram diferentes tipologias de alvéolos (circulares, hexagonais, diamantes e retangulares), variando suas dimensões, espaçamentos e presença de protensão. Os resultados obtidos permitiram identificar os efeitos desses parâmetros sobre os deslocamentos, tensões e capacidade resistente das vigas. A protensão demonstrou influência significativa na redução de deslocamentos e redistribuição das tensões, especialmente em modelos com alvéolos circulares e hexagonais. A validação dos modelos em elementos finitos foi realizada com base em dados experimentais obtidos da literatura, assegurando a confiabilidade das simulações. Observou-se que a remoção estratégica de alguns alvéolos e a introdução de múltiplos desviadores contribuem para melhorar o desempenho estrutural das ViMAPs. Este estudo contribui para o avanço do conhecimento na área de estruturas mistas, oferecendo uma base para futuras pesquisas e aplicações práticas em projetos de engenharia civil.

**Palavras-chave:** Vigas Mistas Alveolares, Protensão, Análise Numérica, ABAQUS/CAE.

## **ABSTRACT**

### **STUDY OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE CASTELLATED PRESTRESSED BEAMS (SCCPB)**

**Author: Brenda Vieira Costa Fontes**

**Supervisor: William Taylor Matias Silva, Dr. Ing.**

**Co-supervisor: Luciano Mendes Bezerra**

**Graduate Program in Structural and Civil Construction Engineering**

**Brasília, April 2025**

This thesis presents a study on the structural behavior of prestressed composite castellated steel-concrete beams (SCCPB), with emphasis on the numerical assessment of different geometric configurations, hole dimensions, prestressing presence, and deviator arrangements. The beams were modeled in three dimensions using the finite element method, from the ABAQUS/CAE software, considering real material properties and complex interactions between steel, concrete, and shear connectors. The analyses involved different hole typologies (circular, hexagonal, diamond-shaped, and rectangular), varying their sizes, spacing, and the application of prestressing. The results made it possible to identify the influence of these parameters on displacements, stresses and the load-carrying capacity of the beams. Prestressing showed a significant influence in reducing displacements and redistributing stresses, especially in models with circular and hexagonal holes. The finite element model validation was performed using experimental data available in the literature, ensuring the reliability of the simulations. It was observed that the strategic removal of some holes and the introduction of multiple deviations contribute to improving the structural performance of SCCPBs. This study contributes to the advancement of knowledge in the field of composite structures, providing a foundation for future research and practical applications in civil engineering projects.

**Keywords:** Composite Castellated Beams, Prestressing, Numerical Analysis, ABAQUS/CAE.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2	JUSTIFICATIVA .....	4
1.3	OBJETIVOS .....	6
1.3.1	Objetivo Geral .....	6
1.3.2	Objetivos Específicos .....	7
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	8
2.2	VIGA ALVEOLAR DE AÇO .....	9
2.3	VIGA MISTA DE AÇO-CONCRETO.....	20
2.4	VIGA DE AÇO PROTENDIDA .....	27
2.5	VIGA MISTA ALVEOLAR.....	34
2.6	VIGA ALVEOLAR PROTENDIDA.....	37
2.7	VIGA MISTA PROTENDIDA.....	38
2.8	VIGA MISTA ALVEOLAR PROTENDIDA .....	45
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TEMA.....</b>	<b>50</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	50
3.2	LAJE DE CONCRETO ARMADO.....	50
3.2.1	Propriedade mecânicas .....	51
3.3	PERFIL DE AÇO.....	52
3.3.1	Propriedades mecânicas.....	52
3.4	SOLDA.....	54
3.4.1	Propriedades mecânicas.....	55
3.5	CONECTORES DE CISALHAMENTO.....	56
3.5.1	Propriedades mecânicas.....	57
3.6	CABOS DE PROTENSÃO .....	58
3.6.1	Propriedade mecânicas .....	59
3.7	DESVIADORES .....	60
3.8	ANCORAGEM DOS CABOS .....	61

<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>64</b>
5.1	VIGAS MODELADAS .....	64
5.2	RELAÇÕES CONSTITUTIVAS DOS MATERIAIS .....	65
5.2.1	Concreto armado.....	65
5.2.2	Perfil de aço.....	74
5.2.3	Armadura passiva .....	76
5.2.4	Conectores de cisalhamento .....	77
5.2.5	Armadura ativa .....	78
5.3	DISCRETIZAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS .....	79
5.4	DISPOSIÇÃO DA MALHA.....	83
5.5	INTERAÇÕES DE CONTATO .....	87
5.6	CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	92
5.7	APLICAÇÃO DE CARGAS .....	93
<b>6</b>	<b>RESULTADOS NUMÉRICOS .....</b>	<b>96</b>
6.1	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	97
6.2	VIGAS MISTAS ALVEOLADAS SEM PROTENSÃO .....	100
6.2.1	Alvéolos Circulares .....	105
6.2.2	Alvéolos Hexagonais.....	112
6.2.3	Alvéolos Diamantes.....	119
6.2.4	Alvéolos Retangulares.....	126
6.3	VIGAS MISTAS ALVEOLADAS PROTENDIDAS .....	133
6.3.1	Alvéolos Circulares .....	133
6.3.2	Alvéolos Hexagonais.....	140
6.3.3	Alvéolos Diamantes.....	147
6.3.4	Alvéolos Retangulares.....	154
6.3.5	Alvéolos Variados .....	161
6.4	VARIAÇÃO DO TAMANHO DOS ALVÉOLOS NA ViMAP.....	164
6.4.1	Alvéolos com tamanho 100% .....	167
6.4.2	Alvéolos com tamanho 75% .....	175
6.4.3	Alvéolos com tamanho 50% .....	184



6.5	ALTERAÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS NA ViMAP.....	191
6.5.1	Alvéolos Circulares .....	192
6.5.2	Alvéolos Hexagonais.....	198
6.6	REMOÇÃO DE ALVÉOLOS NA ViMAP .....	204
6.6.1	Alvéolos Circulares .....	205
6.6.2	Alvéolos Hexagonais.....	211
6.7	PAR DE DESVIADORES COM POSIÇÕES VARIADAS NA ViMAP.....	217
6.7.1	Alvéolos Circulares .....	219
6.7.2	Alvéolos Hexagonais.....	225
6.8	PAR DE DESVIADORES COM ALTERAÇÕES NA ViMAP .....	231
6.8.1	Alvéolos Circulares .....	234
6.8.2	Alvéolos Hexagonais.....	240
6.9	MÚLTIPLOS DESVIADORES COM ALTERAÇÕES NA ViMAP .....	247
6.9.1	Alvéolos Circulares .....	250
6.9.2	Alvéolos Hexagonais.....	258
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>265</b>
7.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....	269
<b>ANEXO A – NOMENCLATURA E DESCRIÇÃO DE TODAS AS VIGAS</b>		
<b>MODELADAS .....</b>		<b>271</b>
<b>ANEXO B – DADOS DE TODAS AS VIGAS MODELADAS .....</b>		<b>276</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>280</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades do concreto armado com $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ .	51
Tabela 3.2 - Propriedades do aço A-36.	54
Tabela 3.3 - Propriedades do aço A108.	58
Tabela 3.4 - Inequações para o diagrama de Magnel (TOKUNAGA, 2020).	60
Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas do concreto.	66
Tabela 5.2 - Ângulo de dilatância encontrado na literatura.	68
Tabela 5.3 - Parâmetro de viscosidade encontrado na literatura.	71
Tabela 5.4 - Parâmetros plásticos para o uso do modelo CDP.	71
Tabela 5.5 - Pontos para definição do <i>Tension Stiffening</i> (SILVA, 2013).	74
Tabela 5.6 - Propriedades mecânicas do perfil de aço.	75
Tabela 5.7 - Equações da curva típica de tensão-deformação do aço (HAN; ZHAO; TAO, 2001).	76
Tabela 5.8 - Propriedades mecânicas da armadura passiva.	76
Tabela 5.9 - Propriedades mecânicas do conector de cisalhamento.	77
Tabela 5.10 - Propriedades mecânicas da armadura ativa.	78
Tabela 6.1 - Indicação das vigas modeladas.	96
Tabela 6.2 - Comparação do deslocamento máximo ( $U_2$ ) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos circulares sem protensão.	106
Tabela 6.3 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos circulares.	106
Tabela 6.4 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.	109
Tabela 6.5 - Comparação da tensão Longitudinal ( $S_{11}$ ) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.	110

Tabela 6.6 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.....	111
Tabela 6.7 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos hexagonais sem protensão.....	113
Tabela 6.8 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos hexagonais. ....	113
Tabela 6.9 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	116
Tabela 6.10 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	117
Tabela 6.11 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	118
Tabela 6.12 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	120
Tabela 6.13 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos diamantes. ....	120
Tabela 6.14 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	123
Tabela 6.15 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	124
Tabela 6.16 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	125
Tabela 6.17 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos retangulares sem protensão. ....	127
Tabela 6.18 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos retangulares.....	127
Tabela 6.19 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.....	130

Tabela 6.20 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.....	131
Tabela 6.21 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.....	132
Tabela 6.22 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos circulares. ....	133
Tabela 6.23 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos circulares.....	134
Tabela 6.24 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	137
Tabela 6.25 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	138
Tabela 6.26 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	139
Tabela 6.27 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	141
Tabela 6.28 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos hexagonais. ....	141
Tabela 6.29 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	144
Tabela 6.30 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	145
Tabela 6.31 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	146
Tabela 6.32 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos diamantes. ....	148
Tabela 6.33 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos diamantes. ....	148

Tabela 6.34 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.....	151
Tabela 6.35 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.....	152
Tabela 6.36 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.....	153
Tabela 6.37 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos retangulares. ....	155
Tabela 6.38 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos retangulares.....	155
Tabela 6.39 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	158
Tabela 6.40 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	159
Tabela 6.41 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	160
Tabela 6.42 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos variados. ....	162
Tabela 6.43 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos variados.....	163
Tabela 6.44 -Indicação das vigas modeladas variando o tamanho dos alvéolos.....	165
Tabela 6.45 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 100%.....	169
Tabela 6.46 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%.....	171
Tabela 6.47 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 75%.....	176

Tabela 6.48 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%.	180
Tabela 6.49 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 50%.	185
Tabela 6.50 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%.	187
Tabela 6.51 -Indicação das vigas modeladas alterando espaçamento.	191
Tabela 6.52 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.	194
Tabela 6.53 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.	196
Tabela 6.54 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.	200
Tabela 6.55 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.	202
Tabela 6.56 -Indicação das vigas modeladas removendo alvéolos.	204
Tabela 6.57 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.	206
Tabela 6.58 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.	209
Tabela 6.59 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.	212
Tabela 6.60 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.	215
Tabela 6.61 -Indicação das vigas modeladas com par extra de desviadores.	217
Tabela 6.62 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.	221

Tabela 6.63 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas. ....	222
Tabela 6.64 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. .	226
Tabela 6.65 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. ....	229
Tabela 6.66 - Indicação das vigas modeladas com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	232
Tabela 6.67 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	235
Tabela 6.68 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	237
Tabela 6.69 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	241
Tabela 6.70 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	244
Tabela 6.71 -Indicação das vigas modeladas com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	248
Tabela 6.72 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	251
Tabela 6.73 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	254
Tabela 6.74 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	259

Tabela 6.75 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	261
--	-----



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fabricação de vigas alveolares. ....	2
Figura 1.2 - Composição da viga mista aço-concreto. ....	2
Figura 1.3 - Vigas protendidas do Hotel Hilton São Paulo Morumbi (FERREIRA, 2007). ....	3
Figura 1.4 - Número de publicações nos últimos anos sobre as premissas utilizadas como pesquisa, dados retirados da base de dados <i>Web of Science</i> . ....	5
Figura 1.5 - Número de publicações nos últimos anos sobre as premissas utilizadas como pesquisa, dados retirados da base de dados <i>SCOPUS</i> . ....	6
Figura 2.1 - Viga Mista Alveolar Protendida (ViMAP). ....	8
Figura 2.2 - Tipos de vigas estudadas. ....	9
Figura 2.3 - Seção transversal de vigas de alma cheia e alveolares. ....	10
Figura 2.4 - Dimensões e forças de corpo livre da abertura de um alvéolo hexagonal (WANG et al., 2016). ....	12
Figura 2.5 - Comparação da carga crítica para 4, 6 e 8 alvéolos (DENG et al., 2015). ....	13
Figura 2.6 - Deformação da alma das vigas acasteladas com “razão de altura de vazio” de 0,520 com 6 furas sem e com enrijecedores (DENG et al., 2015). ....	14
Figura 2.7 - Propriedades geométricas de vigas casteladas (BUDI; SUKAMTA; PARTONO, 2017). ....	16
Figura 2.8 - Viga celular circular apresentada na patente britânica nº 4894898 (WALKER, 1990). ....	19
Figura 2.9 - Detalhe do corte para alvéolos circulares. ....	20
Figura 2.10 - Propriedades geométricas de vigas celulares (HARPER, 1994). ....	20
Figura 2.11 - Detalhes do conector <i>stud bolt</i> (VERÍSSIMO, 2007). ....	21
Figura 2.12 - Interações de contato e condições de contorno para a modelagem de elementos finitos (TAN; UY, 2011). ....	23
Figura 2.13 - Resultados obtidos para viga mista convencional (MESQUITA et al., 2016). ..	25

Figura 2.14 - Elementos do modelo no ABAQUS (BEZERRA et al., 2018). .....	26
Figura 2.15 - Comportamento da viga do exemplo 1 após simulação da ruptura do cabo de protensão de um dos lados da viga (FERREIRA, 2007). .....	29
Figura 2.16 - Condição de contorno para o modelo em uma das extremidades (RIBEIRO, 2018). .....	31
Figura 2.17 - Aplicação da força de protensão a seção transversal do cabo (RIBEIRO, 2018). .....	31
Figura 2.18 - Modelo de viga com protensão enfatizando a aplicação das cargas no ABAQUS (RIBEIRO, 2018). .....	32
Figura 2.19 - As localizações dos cabos nas vigas: (a) Viga simplesmente apoiada junto com o padrão de cabo em forma de V, (b) Viga simplesmente apoiada junto com o padrão de cabo em forma de V modificado, (c) Viga apoiada fixa junto com o padrão de cabo em forma de V, e (d) viga suportada fixa junto com o padrão de cabo em forma de V modificado (FANAIE; PARTOVI; SAFAEI FAEGH, 2021). .....	33
Figura 2.20 - Tabela da frequência natural da viga de aço submetida a diferentes pretensões e com diferentes excentricidades (LIU et al., 2013). .....	34
Figura 2.21 - Detalhe do hexágono (CAVALCANTE, 2005). .....	35
Figura 2.22 - Deformação por carga no meio do vão para vigas compostas com várias razões dos alvéolos (ZUHAIRI; MANSI, 2017). .....	36
Figura 2.23 - Elementos finitos utilizados no desenvolvimento do modelo numérico (BENINCÁ; MORSCH, 2020). .....	37
Figura 2.24 - Flambagem da alma nas vigas CE1, CE2 e CE3, com deslocamentos transversais em cm (BENINCÁ; MORSCH, 2020). .....	37
Figura 2.25 - Visualização da ponte com painéis da alma UHPC pré-fabricados (KOPÁLOVÁ; PRIBRAMSKY, 2018). .....	38
Figura 2.26 - Detalhes da viga experimental (AYYUB; SOHN; SAADATMANESH, 1990). .....	39

Figura 2.27 - Geometria das vigas: vista lateral da viga protendida com cabos drapejados (a) e cabos retos (b) e seção transversal da viga protendida com cabos drapejados (c) e cabos retos (d) (LORENC; KUBICA, 2006). ....	40
Figura 2.28 - Efeito da excentricidade do cabo protendido (UY; CRAINE, 2004). ....	41
Figura 2.29 - Detalhes da viga VMP1 (SILVA, 2018). ....	42
Figura 2.30 - Modos de falha de espécimes selecionadas. (a) Deformação da viga de referência sem pretensão e sem enrijecedores (b) Falha de <i>end zone</i> de espécime BIP50 (c) Falha da amostra BIP50p (d) Empenamento dos enrijecedores verticais da amostra BIIP25 (e) Falha da amostra BIIP50p (f) Falha de compressão da amostra BIIP25 (AFEFY; ATTA; TAHER, 2012). ....	46
Figura 2.31 - Diagrama de interação da flexão-torção (OUKAILI; ABDULLAH, 2017). ....	47
Figura 2.32 - Modos de ruptura dos ensaios experimentais (OUKAILI; ABDULLAH, 2018). ....	49
Figura 2.33 - Comparação da carga resistente dos ensaios experimentais (OUKAILI; ABDULLAH, 2018). ....	49
Figura 3.1 - Viga mista de aço-concreto. ....	50
Figura 3.2 - Diagrama tensão-deformação genérico para aço sem escala (Adaptado de HIBBELER, 2000). ....	53
Figura 3.3 - Diagrama tensão-deslocamento do aço ASTM A-36. ....	54
Figura 3.4 - Viga alveolar soldada. ....	55
Figura 3.5 - Solda de entalhe com penetração total. ....	55
Figura 3.6 - Conector de cisalhamento <i>stud bolt</i> . ....	56
Figura 3.7 - Produtos metálicos obtidos por trefilação. ....	58
Figura 3.8 - Viga protendida com desviador enrijecedor. ....	60
Figura 3.9 - Detalhe da vinculação do cabo de protensão no enrijecedor. ....	61
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa. ....	63
Figura 5.1 - ViMAP completa modelada. ....	64

Figura 5.2 - Modelo constitutivo do concreto comprimido (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004b).....	72
Figura 5.3 - Modelo constitutivo do concreto tracionado (ABAQUS, 2014). ....	73
Figura 5.4 - Curva tensão x deslocamento na fase pós-pico ( <i>Tension Stiffening</i> ) admitida para o concreto tracionado no modelo numérico (SILVA, 2013). ....	74
Figura 5.5 – Diagrama da curva típica de tensão-deformação do aço fora de escala (HAN; ZHAO; TAO, 2001). ....	75
Figura 5.6 – Diagrama típico tensão-deformação para aços de armadura passiva (ABNT, 2014). ....	77
Figura 5.7 - Diagrama tensão x deformação para aço do conector de cisalhamento (KOTINDA, 2006).....	78
Figura 5.8 - Diagrama tensão x deformação para aços de armadura ativa (ABNT, 2014). ....	79
Figura 5.9 - Elemento SOLID C3D8R (ABAQUS, 2014). ....	80
Figura 5.10 - Elemento SHELL S4R (ABAQUS, 2014).....	81
Figura 5.11 - Elemento TRUSS T3D2 (ABAQUS, 2014). ....	81
Figura 5.12 - Elemento BEAM B31 (ABAQUS, 2014).....	82
Figura 5.13 - Discretização do conector de cisalhamento. ....	83
Figura 5.14 - Peças modeladas e seus elementos. ....	83
Figura 5.15 - Curva carga-deslocamento da alma variando o tamanho da malha (WANG; WANG; MA, 2014).....	85
Figura 5.16 - Disposição da malha da laje de concreto armado. ....	86
Figura 5.17 - Disposição da malha do perfil I de aço.....	86
Figura 5.18 - Malha do conector de cisalhamento.....	87
Figura 5.19 - Discretização cabo de protensão.....	87
Figura 5.20 - Interação entre armadura passiva e laje de concreto.....	88
Figura 5.21 - Interação entre perfil de aço e laje de concreto com “ <i>Tie constrain</i> ”.....	89

Figura 5.22 - Interação entre perfil de aço e conectores de cisalhamento.....	90
Figura 5.23 - Interação entre laje de concreto e conectores de cisalhamento. ....	90
Figura 5.24 - Vinculação do cabo de protensão com o enrijecedor. ....	91
Figura 5.25 - Vinculação do desviador com o ponto de referência.....	92
Figura 5.26 - Vinculação do ponto de referência com o cabo de protensão.....	92
Figura 5.27 - Detalhe da vinculação de apoio na viga (biapoiada). ....	93
Figura 5.28 - Área de aplicação de cargas externas no modelo. ....	94
Figura 5.29 - Posição das cargas externas no modelo. ....	94
Figura 5.30 - Carga de temperatura inicial pelos cabos de protensão. ....	95
Figura 6.1 - Perfil tipo Padrão. ....	97
Figura 6.2 - Curva carga x deslocamento das vigas sem alvéolos e sem protensão.....	99
Figura 6.3 - Curva carga x deslocamento das vigas sem alvéolos e com protensão. ....	100
Figura 6.4 - Perfis com alvéolos Circulares. ....	101
Figura 6.5 - Perfis com alvéolos Hexagonais. ....	102
Figura 6.6 - Perfis com alvéolos Diamantes.....	103
Figura 6.7 - Perfis com alvéolos Retangulares.....	104
Figura 6.8 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos circulares sem protensão. ....	105
Figura 6.9 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão. ....	109
Figura 6.10 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.....	110
Figura 6.11 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.....	111
Figura 6.12 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	112

Figura 6.13 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	116
Figura 6.14 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	117
Figura 6.15 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão. ....	118
Figura 6.16 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	119
Figura 6.17 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	123
Figura 6.18 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	124
Figura 6.19 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão. ....	125
Figura 6.20 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos retangulares sem protensão. ....	126
Figura 6.21 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão. ....	130
Figura 6.22 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão. ....	131
Figura 6.23 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão. ....	132
Figura 6.24 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos circulares. ...	134
Figura 6.25 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	137
Figura 6.26 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	138

Figura 6.27 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares. ....	139
Figura 6.28 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	140
Figura 6.29 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	144
Figura 6.30 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	145
Figura 6.31 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais. ....	146
Figura 6.32 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos diamantes. ....	147
Figura 6.33 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes. ....	151
Figura 6.34 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes. ....	152
Figura 6.35 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes. ....	153
Figura 6.36 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos retangulares. ....	154
Figura 6.37 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	158
Figura 6.38 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	159
Figura 6.39 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares. ....	160
Figura 6.40 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos variados. ....	162
Figura 6.41 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e hexagonais reduzidos. ....	166
Figura 6.42 - Dimensões das vigas com alvéolos diamantes e retangulares reduzidos. ....	167

Figura 6.43 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 100%. .....	168
Figura 6.44 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%. .....	172
Figura 6.45 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%. .....	173
Figura 6.46 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%. .....	174
Figura 6.47 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 75%. .....	175
Figura 6.48 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%. .....	181
Figura 6.49 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%. .....	182
Figura 6.50 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%. .....	183
Figura 6.51 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 50%. .....	184
Figura 6.52 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%. .....	188
Figura 6.53 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%. .....	189
Figura 6.54 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%. .....	190
Figura 6.55 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e hexagonais com espaçamentos alterados. ....	192
Figura 6.56 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados. .....	193



Figura 6.57 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.....	197
Figura 6.58 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados. ....	197
Figura 6.59 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados. ....	198
Figura 6.60 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados. ....	199
Figura 6.61 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.....	202
Figura 6.62 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.....	203
Figura 6.63 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.....	203
Figura 6.64 - Ilustração das vigas com alvéolos circulares e hexagonais com alvéolos removidos. ....	205
Figura 6.65 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs removendo alvéolos circulares .....	206
Figura 6.66 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.....	209
Figura 6.67 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares. ....	210
Figura 6.68 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.....	210
Figura 6.69 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais....	211
Figura 6.70 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais. ....	215
Figura 6.71 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.....	216

Figura 6.72 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais. ....	216
Figura 6.73 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e um par de desviadores extras em posições variadas. ....	218
Figura 6.74 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras em posições variadas. ....	218
Figura 6.75 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas. ....	220
Figura 6.76 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas. ....	223
Figura 6.77 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas. ....	224
Figura 6.78 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas. ....	225
Figura 6.79 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. ....	226
Figura 6.80 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. ....	229
Figura 6.81 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. ....	230
Figura 6.82 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas. ....	231
Figura 6.83 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares, um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	233
Figura 6.84 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais, um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	233
Figura 6.85 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	234

Figura 6.86 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	238
Figura 6.87 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	239
Figura 6.88 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	240
Figura 6.89 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	241
Figura 6.90 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	245
Figura 6.91 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	246
Figura 6.92 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga. ....	247
Figura 6.93 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares, múltiplos desviadores extras e alterações na viga.....	249
Figura 6.94 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais, múltiplos desviadores extras e alterações na viga.....	250
Figura 6.95 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	251
Figura 6.96 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	255
Figura 6.97 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	256
Figura 6.98 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	257
Figura 6.99 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	258

Figura 6.100 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	262
Figura 6.101 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	263
Figura 6.102 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga. ....	264

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$A$	Domínio de área
$A_s$	Área da seção transversal
$b_n$	Vetor forças de corpo
$c_d$	Velocidade de propagação da onda de tensão
$c_n$	Parâmetro de amortecimento
$C$	Matriz de amortecimento
$d$	Diâmetro do parafuso
$d_c$	Variável de dano na compressão
$d_q$	Variável de dano
$d_t$	Variável de dano na tração
$D_0^{el}$	Tensor de rigidez elástica
$D_V$	Deslizamento longitudinal
$E_0$	Módulo de elasticidade secante
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade inicial
$f_{b0}$	Tensão de início de não linearidade na compressão biaxial
$f'_c$	Resistência à compressão do concreto
$f_{c0}$	Tensão de início de não linearidade na compressão uniaxial
$f_{cm}$	Resistência à compressão média
$f_{ck}$	Resistência à compressão característica
$f_{ext}$	Vetor de força externa
$f_{int}$	Vetor de força interna
$f_{sk}$	Tensão de escoamento característica do aço
$f_{r0}$	Tensão de tração na falha
$f_{tm}$	Resistência à tração média
$f_u$	Resistência última especificada para o material do conector
$f_{ut}$	Resistência última do material do conector obtida por ensaio
$F$	Critério de escoamento
$G$	Fluxo potencial plástico
$G_{ch}$	Energia de esmagamento do concreto por unidade de área
$G_f$	Energia de fratura por unidade de área
$h$	Altura do conector treliçado
$J_2$	Segundo invariante do tensor desviador
$\bar{K}$	Módulo de massa
$\bar{K}$	Matriz de rigidez do elemento finito
$K_c$	Razão entre as tensões desviadoras na tração e compressão uniaxial
$l_{ab}$	Distância horizontal de abertura entre a base das hastes
$l_c$	Dimensão característica do elemento
$l_{eq}$	Comprimento equivalente do elemento finito
$l_t$	Soma da distância horizontal de abertura entre a base das hastes e comprimento das pernas horizontais de fixação
$M$	Matriz de massa

$p$	Pressão hidrostática
$P_{exp}$	Carga última ensaio experimental
$P_{MEF}$	Carga última pelo Método dos Elementos Finitos
$P_{Rk}$	Resistência característica
$P_u$	Carga última
$Pu_{méd}$	Carga última média
$q$	Tensão efetiva equivalente de Von Mises
$Q_{MEF}$	Resultados de resistência da cantoneira da simulação numérica
$R^2$	Coeficiente de determinação
$t$	Tempo
$t_n$	Vetor forças de superfície
$T$	Período da análise
$u$	Vetor de deslocamento
$\dot{u}$	Vetor de velocidade
$\ddot{u}$	Vetor de aceleração
$V$	Domínio de volume
$w_c$	Abertura de fissura crítica

## LETRAS GREGAS

Símbolo	Significado
$\alpha$	Ângulo de abertura entre hastes do conector treliçado
$\beta$	Inclinação das hastes do conector treliçado
$\gamma_V$	Fator parcial de segurança
$\delta_u$	Capacidade de deslizamento
$\delta_{uk}$	Capacidade de deslizamento característica
$\delta_{\epsilon n}$	Vetor associado a deformação virtual
$\delta u_n$	Vetor de deslocamento virtual
$\Delta \epsilon_{vol}$	Incremento de deformação volumétrica
$\Delta e$	Incremento de deformação desviadora
$\Delta p$	Incremento de tensão hidrostática
$\Delta S$	Incremento de tensões desviadora
$\Delta t$	Incremento de tempo
$\dot{\epsilon}$	Taxa do tensor deformação
$\dot{\epsilon}^{el}$	Taxa de deformação elástica
$\dot{\epsilon}^{pl}$	Taxa de deformação plástica
$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$	Taxa de deformação plástica equi. ou parâmetro de consistência plástica
$\epsilon_t$	Deformação de tração
$\epsilon_{0t}^{el}$	Deformação de tração elástica não danificada
$\epsilon_t^{ck}$	Deformação de fissuração
$\epsilon_t^{el}$	Deformação de tração elástica danificada
$\epsilon_t^{pl}$	Deformação de tração plástica
$\epsilon_{tm}$	Deformação de tração média
$\epsilon_u$	Deformação última
$\epsilon_y$	Deformação de escoamento
$\xi_{max}$	Fração de amortecimento crítico
$\hat{\lambda}$	Constante de Lamé
$\hat{\mu}$	Constante de Lamé
$\rho$	Densidade do material
$\rho_n$	Densidade de massa
$\rho_{c0}$	Tensão desviadora na compressão
$\rho_{t0}$	Tensão desviadora na tração
$\sigma$	Tensor tensão
$\dot{\sigma}$	Taxa do tensor tensão
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\bar{\sigma}_c$	Tensão de coesão efetiva de compressão
$\sigma_{max}$	Tensão principal efetiva máxima
$\sigma_n$	Vetor de tensões
$\sigma_t$	Tensão de tração
$\bar{\sigma}_t$	Tensão de coesão efetiva de tração
$\sigma_u$	Tensão última
$\sigma_y$	Tensão de escoamento
$\varphi$	Ângulo de dilatância
$\phi$	Ângulo de atrito interno
$\omega_{max}$	Maior frequência natural

## ABREVIATURAS

ímbolo	Significado
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	American Institute of Steel Construction
AISI	American Iron and Steel Institute
ANSI	American National Standards Institute
AS/NZS	Standards Australia
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
BSI	British Standard Institute
CAN/CSA	Canadian Standards Association
CDP	Concrete Damaged Plasticity
CEN	Comité Européen de Normalisation
COR	Aço anticorrosivo ou aço patinável
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
Eurocode	European Committee for Standardization
GEP	Gene Expression Programming
LGP	Linear Genetic Programming
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SHS	Square Hollow Section
UHPC	Ultra-High-Performance Concrete



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o início da utilização das estruturas metálicas na construção civil no século XVIII até os dias atuais, o aço possibilitou aos engenheiros e arquitetos de todo o mundo construções mais eficientes, arrojadas e com alta qualidade. Nos últimos anos, o uso do aço no Brasil tem sido bastante estimulado, principalmente devido às diversas vantagens que as estruturas metálicas apresentam no campo da construção civil.

Como vantagens das estruturas de aço pode-se citar a liberdade nos projetos arquitetônicos, maior área útil proporcionando maiores vãos e maior aproveitamento do espaço construído, flexibilidade para adaptações e reformas, compatibilidade com outros materiais, menor prazo de execução da obra, canteiro de obras reduzido e organizado e garantia de qualidade e precisão construtiva do aço, entre outras. Estas vantagens, assim como outras, tornam o aço uma grande alternativa como material construtivo para obras de engenharia.

Além disso, as estruturas de aço possibilitam uma grande variedade de perfis com dimensões, formas e aplicações distintas, podendo variar entre perfis soldados, perfis laminados ou perfis formados a frio, dependendo da necessidade do projeto, assim como os perfis alveolares.

Com o avanço das pesquisas e dos processos de engenharia, diversos sistemas construtivos inovadores estão sendo desenvolvidos e utilizados em todo o mundo.

As vigas alveolares podem ser fabricadas cortando longitudinalmente perfis de aço de alma cheia. Os cortes seguem um determinado padrão, produzindo duas peças separadas que podem ser acasteladas e soldadas. Este procedimento resulta em uma nova configuração de viga onde suas mesas podem ser colocados mais afastados, conforme mostra a Figura 1.1.

A viga alveolar, feita a partir da viga original de alma cheia cortando e acastelando, apresenta maior rigidez à flexão um aumento da altura e, conseqüentemente, aumento do momento de inercia, sem alterar o seu peso próprio da viga original.

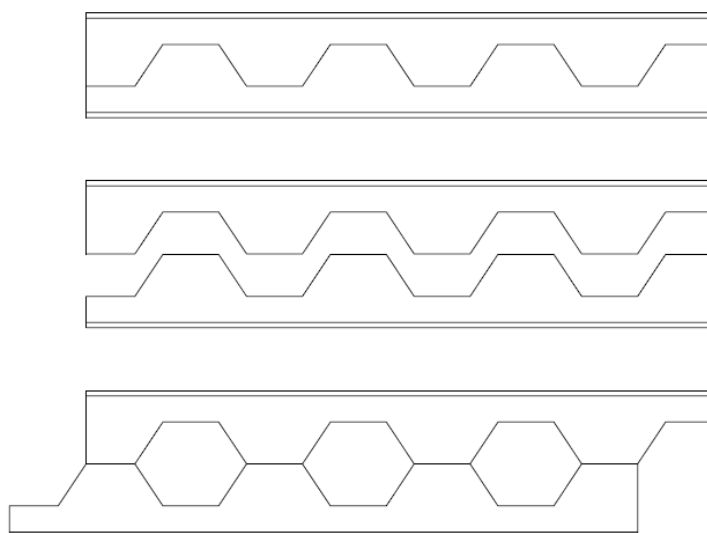


Figura 1.1 - Fabricação de vigas alveolares.

Na maioria das estruturas metálicas para edifícios e pontes, é comum utilizar lajes de concreto armado sobre as vigas de aço. É possível fazer com que os dois materiais trabalhem em conjunto, originando os elementos mistos de aço e concreto. Essa técnica é utilizada para aumentar a rigidez à flexão e a resistência às solicitações da viga.

Com a laje de concreto armado apoiada sobre o perfil de aço e conectada por meios de conectores de cisalhamento, é necessário considerar as contribuições desses dois elementos na estrutura, funcionando como uma viga “T” mista de aço-concreto, onde há solidariedade no funcionamento da viga de ambos os componentes, como mostra a Figura 1.2.

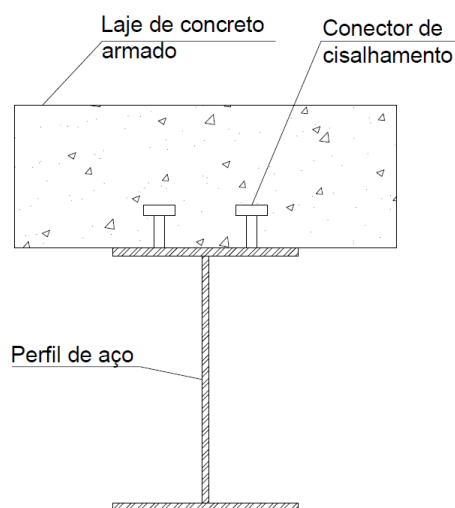


Figura 1.2 - Composição da viga mista aço-concreto.

Em 2001, foi registrado um caso bem-sucedido de emprego de vigas de aço protendidas para a readequação de uma área do Hotel Hilton São Paulo Morumbi, em São Paulo. O projeto foi feito pelo Eng. Mario Franco, com consultoria da Eng.<sup>a</sup> Heloísa Maringoni (JARDIM et al., 2021). O objetivo era implementar salas de convenções, o que exigia a ampliação do vão existente de 7,5 m para 15 m. A solução proposta envolveu a remoção de pilares e a inclusão de vigas de transição com seção de aço protendido externamente (Figura 1.3), atendendo ao limite máximo de altura de 90 cm (Mazza, 2002, citado por (FERREIRA, 2007)).

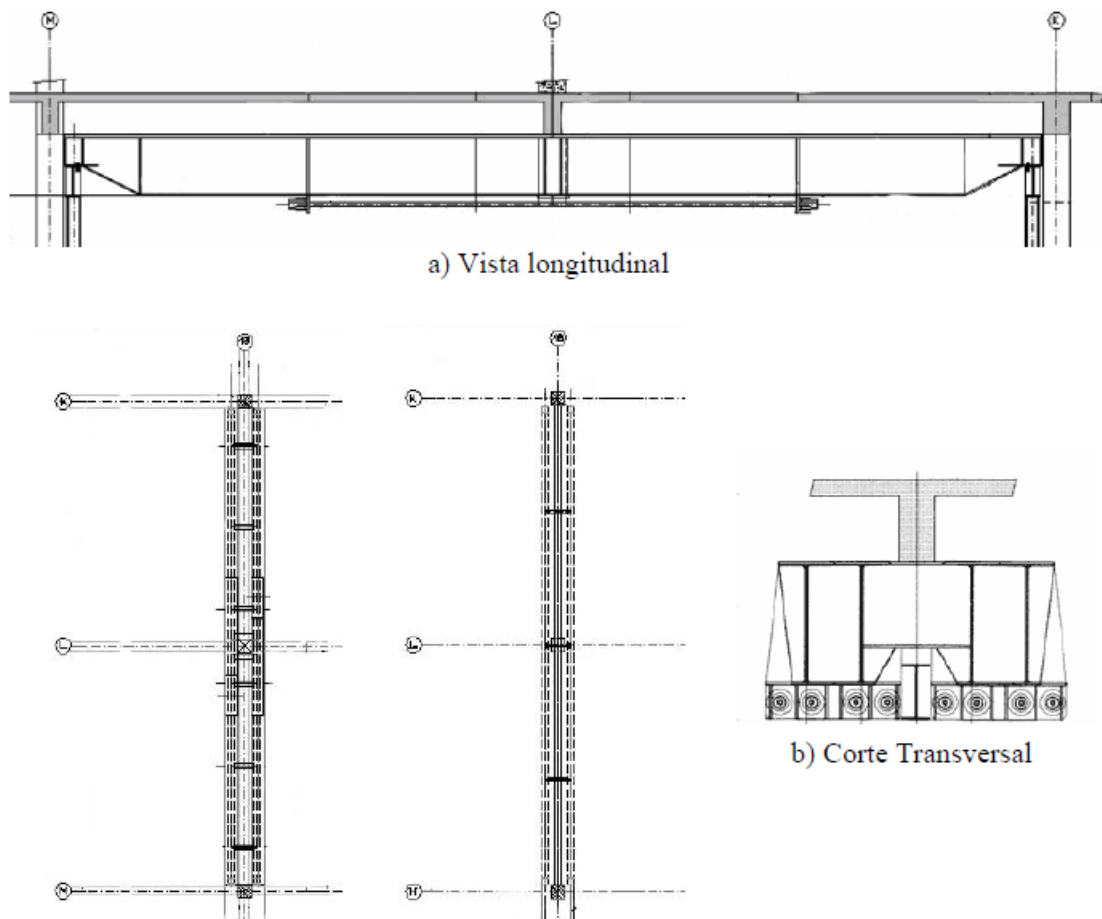


Figura 1.3 - Vigas protendidas do Hotel Hilton São Paulo Morumbi (FERREIRA, 2007).

O uso combinado dessas técnicas para vigas mistas de aço-concreto com perfil alveolar em associação com um par de cabos de protensão fará com que essas vigas “T” superem grandes vãos livres. A viga resultante pode ser denominada Viga Mista Alveolar Protendida de aço-concreto (ViMAP) ou *Steel-Concrete Composite Castellated Prestressed Beam* (CCPB).

Os cabos de protensão fornecem maior rigidez à flexão para a estrutura. A aplicação de vigas ViMAP com protensão garantirá maior resistência ao carregamento externo, dependendo do layout assumido para o cabo de protensão.

Podem se tornar largamente empregados no setor de construção civil, principalmente para pontes e edifícios altos devido à sua resistência e leveza. Sua utilização permite que o projeto de vãos maiores alcance soluções mais econômicas e sustentáveis.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O uso de vigas mistas alveolares protendidas na engenharia civil está ganhando popularidade devido às suas vantagens em termos de redução de peso, economia de material e capacidade de vencer grandes vãos, podendo ser utilizadas em pontes, viadutos e outras obras da engenharia. Além disso, a presença dos alvéolos gera um apelo estético arquitetônico, assim como a utilização das aberturas para passagem de dutos, ventilação e iluminação.

No entanto, as perfurações nos perfis de aço introduzem complexidades no comportamento estrutural das vigas, tornando essencial uma análise detalhada para garantir a integridade estrutural. Este estudo justifica-se pela necessidade de compreender como diferentes geometrias de alvéolos, hexagonais e circulares, influenciam o comportamento das vigas, permitindo decisões informadas sobre o design estrutural. A redução do uso de material não só diminui os custos de produção e transporte, mas também reduz o impacto ambiental, alinhando-se com as tendências de sustentabilidade na construção civil.

A aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) neste estudo proporciona uma abordagem avançada para a simulação e validação das metodologias de modelagem das vigas alveolares. Este método permite uma avaliação precisa das tensões internas e do comportamento global das vigas, considerando diferentes geometrias de perfurações. A análise comparativa entre as perfurações hexagonais e circulares fornecerá insights valiosos sobre as melhores práticas de design e fabricação, contribuindo para o avanço da engenharia estrutural. Além disso, os resultados deste estudo poderão servir de base para futuras pesquisas, incentivando o desenvolvimento de novas técnicas e materiais que aprimorem ainda mais a eficiência e a sustentabilidade das construções.

No que diz respeito a uma visão global, torna-se necessário investigar o desenvolvimento do tema deste trabalho em sua literatura internacional. Para tanto, foi realizada uma pesquisa conforme a metodologia proposta por Mariano e Rocha (2017), utilizando a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC). Foram empregados três termos principais de pesquisa: "*castellated-beam*", "*composite steel-concrete beam*" e "*prestressed steel beam*" nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Os temas foram analisados concomitantemente, e observou-se um crescente interesse pelo tema nos últimos anos, evidenciado pelo aumento no número de artigos publicados até o momento (Figura 1.4 e Figura 1.5).

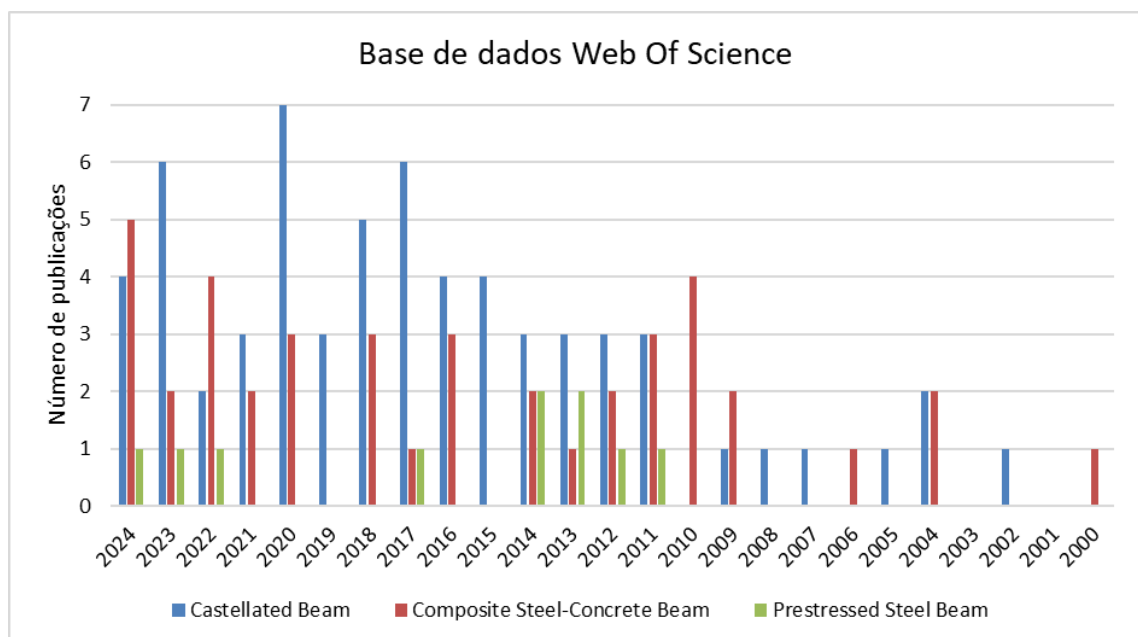


Figura 1.4 - Número de publicações nos últimos anos sobre as premissas utilizadas como pesquisa, dados retirados da base de dados *Web of Science*.

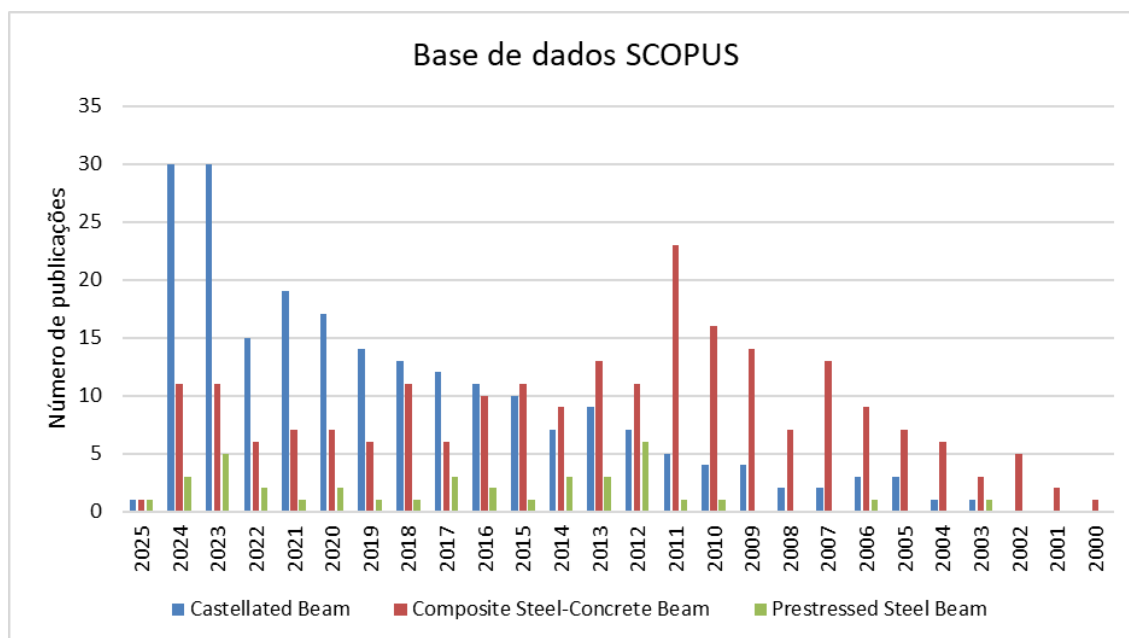


Figura 1.5 - Número de publicações nos últimos anos sobre as premissas utilizadas como pesquisa, dados retirados da base de dados *SCOPUS*.

Apesar do número de pesquisas avaliando os temas de maneira separada está aumentando, existem poucos estudos contemplando os três tópicos de uma vez.

Ainda, por ser um assunto inovador, não existem formulações normativas, brasileiras e internacionais, para vigas ViMAP nessa situação de utilização, apenas valores tabelados. Isso representa uma lacuna importante para a comunidade científica, mostrando a grande motivação deste estudo.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta tese é desenvolver um modelo numérico para estudar o comportamento estrutural e as distribuições de tensões em Vigas Mistas Alveolares Protendidas de aço-concreto (ViMAP), utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o software ABAQUS/CAE. A pesquisa visa explorar as interações entre os componentes de aço e concreto, além dos efeitos dos cabos de protensão, para fornecer uma compreensão mais detalhada e abrangente dessas estruturas. Este estudo pretende contribuir para a literatura técnica, oferecendo diretrizes para o dimensionamento e a aplicação prática de ViMAPs.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto visam compreender o desempenho da ViMAP, a partir de modelos numéricos, será possível obter informações sobre a nova viga desenvolvida, incluindo:

- Desenvolver um modelo numérico tridimensional no software ABAQUS/CAE;
- Validar o modelo numérico desenvolvido por meio de dados de experimentais;
- Realizar análises paramétricas, investigando a influência de diferentes configurações geométricas, tipos de aberturas, número de alvéolos e desviadores;
- Comparar o desempenho estrutural das ViMAPs com diferentes formatos de alvéolos (circulares, hexagonais, diamantes e retangulares);
- Analisar a influência do tamanho dos alvéolos (100%, 75% e 50%) no desempenho estrutural, avaliando rigidez, redistribuição de tensões e eficiência estrutural;
- Avaliar o impacto da variação do espaçamento entre alvéolos (120 mm, 150 mm e 200 mm) na distribuição das tensões e na capacidade de carga das ViMAPs;
- Investigar os efeitos da remoção seletiva de alvéolos nas extremidades na redistribuição de tensões e no desempenho estrutural das ViMAPs;
- Quantificar a contribuição da protensão no comportamento das ViMAPs, comparando vigas protendidas e não protendidas;
- Avaliar a influência da adição de desviadores intermediários no comportamento estrutural das ViMAPs, analisando sua eficiência na redistribuição de esforços e no controle de deslocamentos;
- Comparar o desempenho estrutural entre ViMAPs com protensão total e protensão concentrada na região intermediária, analisando seus efeitos em termos de deslocamento, capacidade de carga e distribuição de tensões.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As vigas mistas alveolares protendidas são vigas formadas pela união de três técnicas construtivas, sendo elas a viga alveolar de aço, a viga mista de aço-concreto e a viga de aço protendida, como mostra a Figura 2.1.

Para melhor entender o comportamento da ViMAP, foi feito um estudo sobre cada uma das técnicas de forma individual, para que em seguida possa ser feita a combinação dos métodos construtivos.

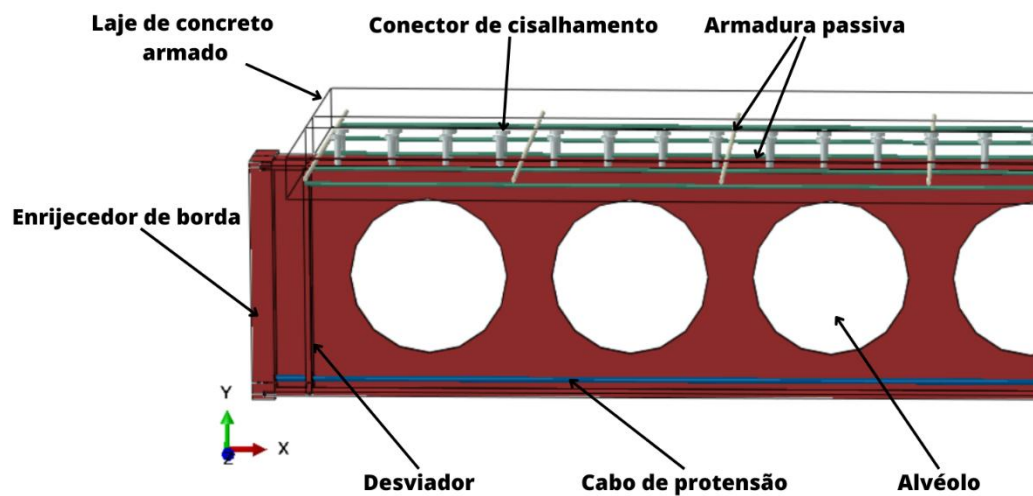


Figura 2.1 - Viga Mista Alveolar Protendida (ViMAP).

Serão apresentados a seguir diversos trabalhos que consideraram o comportamento dos componentes das vigas mistas alveolares protendidas, através de pesquisas analíticas, experimentais e/ou numéricas.

As categorias de vigas estudadas seguem as divisões da Figura 2.2.



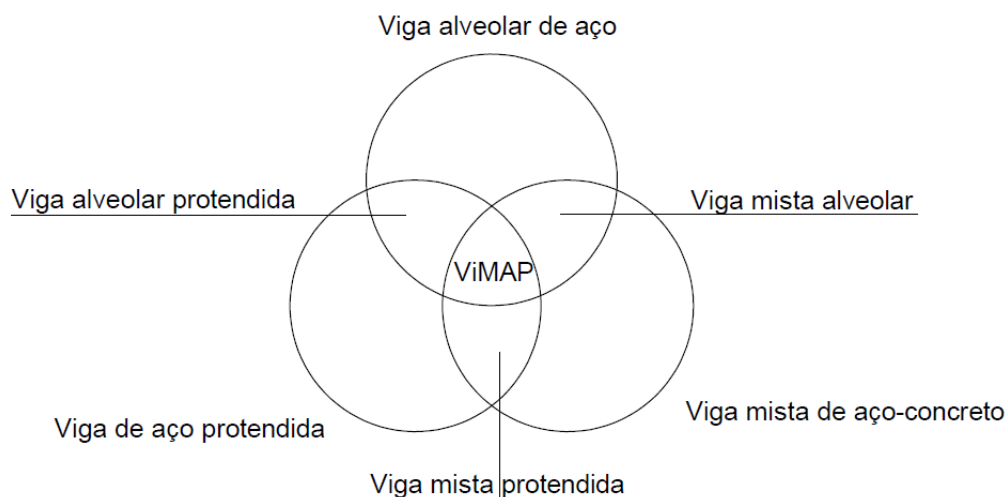


Figura 2.2 - Tipos de vigas estudadas.

## 2.2 VIGA ALVEOLAR DE AÇO

A técnica de cortar um perfil de aço e depois soldá-lo novamente, formando um perfil alveolar, proporciona diversas vantagens construtivas, aumentando a altura da viga e mantendo o peso da estrutura. Proporcionando um aumento significativo da capacidade de carga e redução da flecha no meio do vão sob carga de serviço quando comparada a viga alveolar com a viga de aço maciça (HADEED; HUSSAIN ALSHIMMERI, 2019).

No entanto, sabe-se que a retirada de material da região da alma para formar os alvéolos (aberturas) torna o perfil resultante mais suscetível à falha por força cortante (COLDEBELLA, 2019).

Com base em estudos experimentais, modelagens numéricas e análises paramétricas, foram identificados os principais modos de falha. Nesta identificação, ficou evidente uma primeira dificuldade que é a determinação dos esforços máximos, pois cada alvéolo está sujeito a um determinado valor de momento fletor e de força cortante (COLDEBELLA, 2019).

Para que a capacidade resistente do perfil seja calculada corretamente, precisa-se determinar a seção transversal que apresentará a combinação mais desfavorável de carregamento. Na Figura 2.3 é apresentada as dimensões da seção transversal de vigas de alma cheia e alveolares.

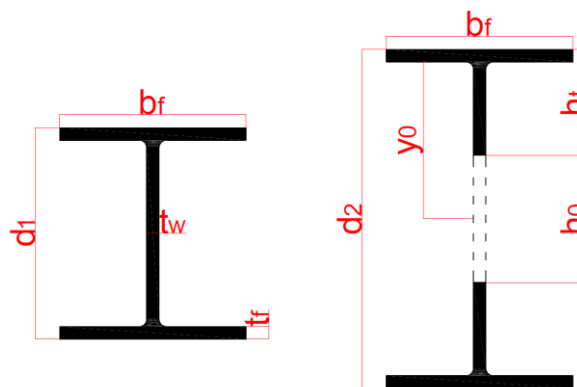


Figura 2.3 - Seção transversal de vigas de alma cheia e alveolares.

Diferentes são os modos de falha em perfis alveolares, os principais modos são:

- Formação do mecanismo Vierendeel é a formação de rótulas plásticas nos cantos das aberturas, deformando a alma do perfil (KERDAL; NETHERCOT, 1984). O colapso da seção acontecerá na abertura em que a máxima força cortante estiver atuando. Em situação de mesma força cortante, esse colapso ocorrerá na abertura em que atuar o maior momento fletor (BADKE-NETO; CALENZANI; FERREIRA, 2015);
- Formação de rótula plástica onde o momento fletor leva ao escoamento por tração e compressão (BADKE-NETO et al., 2013);
- Ruptura da solda entre as aberturas ocorre quando a tensão horizontal de cisalhamento excede a capacidade resistente da solda, a probabilidade de ocorrência desta falha aumenta à medida que se reduz a distância entre as aberturas (COLDEBELLA, 2019; KERDAL; NETHERCOT, 1984);
- Instabilidade do montante de alma por cisalhamento devido à atuação da força cortante ao longo da solda (BEZERRA, 2011)
- Instabilidade por compressão do montante de alma devido à aplicação de cargas concentradas ou reações de apoio diretamente no montante da alma (BADKE-NETO et al., 2013; BADKE-NETO; CALENZANI; FERREIRA, 2015; KERDAL; NETHERCOT, 1984);
- Instabilidade lateral com torção caracterizada por deslocamento lateral e giro da seção transversal (KERDAL; NETHERCOT, 1984).

O formato da abertura de um perfil alveolar pode alterar o seu comportamento. Nesse trabalho, serão analisados os perfis com abertura circular e hexagonal, ou também conhecidos como celular e acastelado, respectivamente.

Mohebkah (2004) fez um estudo numérico de vigas alveolares utilizando o *software* ANSYS e percebeu que a esbeltez modificada dessas vigas parece ter uma influência significativa no fator momento-gradiente. Em outras palavras, o valor de  $C_b$  não é constante em toda a faixa de esbeltez da viga acastelada, enquanto o AISC dá um valor constante para qualquer faixa de esbeltez. Portanto, pode-se concluir que a avaliação do fator momento-gradiente depende não apenas das condições de carregamento, mas também da esbeltez modificada das vigas acasteladas.

Pachpor et al. (2010) fizeram um estudo paramétrico de vigas alveolares de aço utilizando o *software* ANSYS, e eles concluíram que à medida que o alvéolo se move em direção ao centro da viga vai reduzindo a flexa da mesma, e que para uma maior razão  $d/D$  o deslocamento será maior, sendo  $d$  a altura da abertura do alvéolo hexagonal e  $D$  a altura total da alma do perfil de aço.

Mirza e Uy (2010) fizeram um estudo experimental e numérico de vigas mistas de aço, focando na análise das tensões dos conectores de cisalhamento tipo *stud* utilizando o *software* ABAQUS. A não linearidade da conexão de cisalhamento sempre resulta em mudanças significativas na resistência e ductilidade das vigas mistas aço-concreto. Quando as normas Australianas, Europeias e Americanas são comparadas com os resultados de elementos finitos, as normas australianas e as normas americanas parecem estar superestimando a capacidade do conector de cisalhamento, enquanto o Eurocode 4 (2004a) subestimou grosseiramente a resistência dos conectores de cisalhamento para lajes perfiladas. Das três normas existentes, a Norma Americana (AISC, 1999) parece ser menos conservadora onde foi observada maior carga última.

Silveira (2011) elaborou modelos numéricos de vigas alveolares usando o *software* ABAQUS e comparou com resultados experimentais. Observou-se que em diversos casos é difícil a identificação de um único modo de colapso, e que em muitas vezes ocorrem fenômenos acoplados. Além disso, em uma viga acastelada de 3m, houve a evidente formação de uma rótula plástica nas seções próximas à borda direita da primeira abertura hexagonal.

Alminhana (2014) concluiu em sua tese que no caso de vãos curtos e cargas baixas, as vigas alveolares que utilizam perfis de menor altura e que possuem capacidade de resistir aos esforços oriundos da formação de mecanismo plástico, possibilitando uma alta economia de aço.

Também enfatizou o cuidado com as forças pontuais residuais do corte do perfil de alma cheia para elaboração dos alvéolos, que podem reduzir a resistência do perfil.

Wang et al. (2016) avaliou perfis com abertura hexagonal, dando ênfase à capacidade resistente da alma à flambagem por cisalhamento utilizando modelagem numérica no ABAQUS; o principal resultado desse estudo foi a proposição de um parâmetro de instabilidade  $k$  para esse modo de falha específico, indicado na equação (2.1).

$$k = V_{cr} \cdot \frac{(h_0/t_w)^2}{Eet_w} \cdot \frac{s}{h - 2y_i} \quad (2.1)$$

Onde:  $k$  é o coeficiente de flambagem por cisalhamento da parte superior do montante da alma sob força de cisalhamento horizontal;  $V_{cr}$  é a força de cisalhamento vertical da alma do perfil;  $h_0$  é a altura da abertura da alma;  $t_w$  é a espessura do montante da alma;  $E$  é o módulo de Young do aço;  $e$  é a largura do montante da alma;  $s$  é a distância entre duas aberturas adjacentes da alma;  $h$  é a altura da seção da viga alveolar; e  $y_i$  é a distância da mesa ao centroide da seção T. As dimensões da viga estão ilustradas na Figura 2.4.

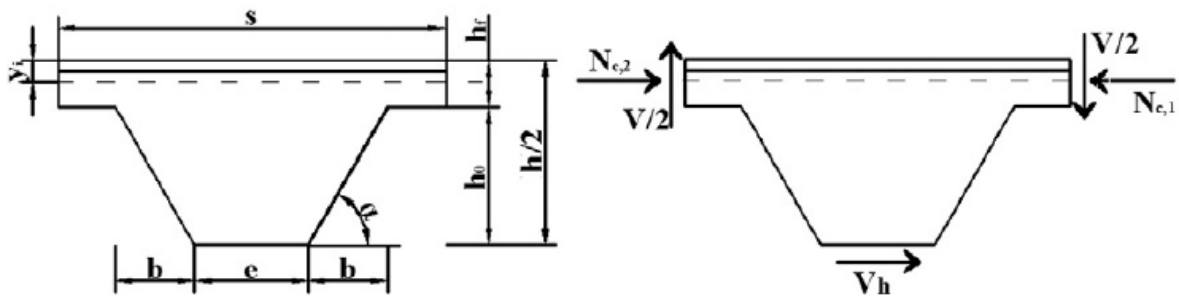


Figura 2.4 - Dimensões e forças de corpo livre da abertura de um alvéolo hexagonal (WANG et al., 2016).

Deng et al. (2015) realizaram simulações numéricas utilizando o *software* ANSYS para determinar a capacidade de flambagem local de vigas acasteladas e vigas I, considerando "razão de altura de vazio", que significa a taxa da altura dos furos para a altura das vigas, e o números de alvéolos na viga, com e sem reforço. O estudo apontou que, sob a carga uniforme, a posição de flambagem das vigas acasteladas hexagonais ocorre no primeiro alvéolo próximo ao final da

viga e a deformação máxima ocorre no canto da parte superior dos alvéolos (Figura 2.6), enquanto os membros I ocorrem no meio do vão. Além disso, com diferentes aberturas de furos, a melhoria da carga crítica com reforços pode aumentar de 10% a 40%, com mostra a Figura 2.5. Isso indica que os enrijecedores podem melhorar efetivamente a rigidez anti-flambagem de vigas acasteladas. Comparando as deformações e cargas críticas de vigas acasteladas e vigas I, mostra que nas mesmas condições de flambagem, vigas acasteladas com reforços podem ser mais úteis do que vigas I. A configuração de reforços é uma boa forma de aplicação de vigas acasteladas.

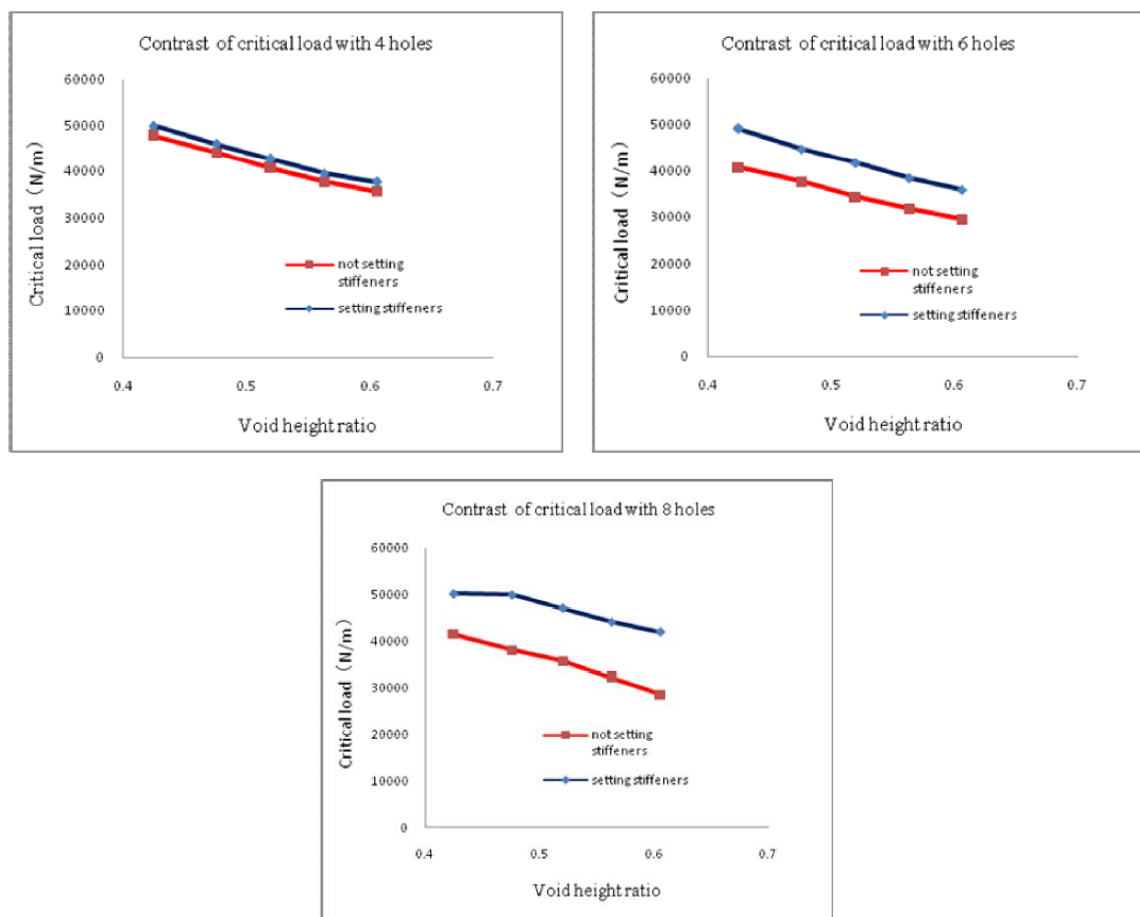


Figura 2.5 - Comparação da carga crítica para 4, 6 e 8 alvéolos (DENG et al., 2015).

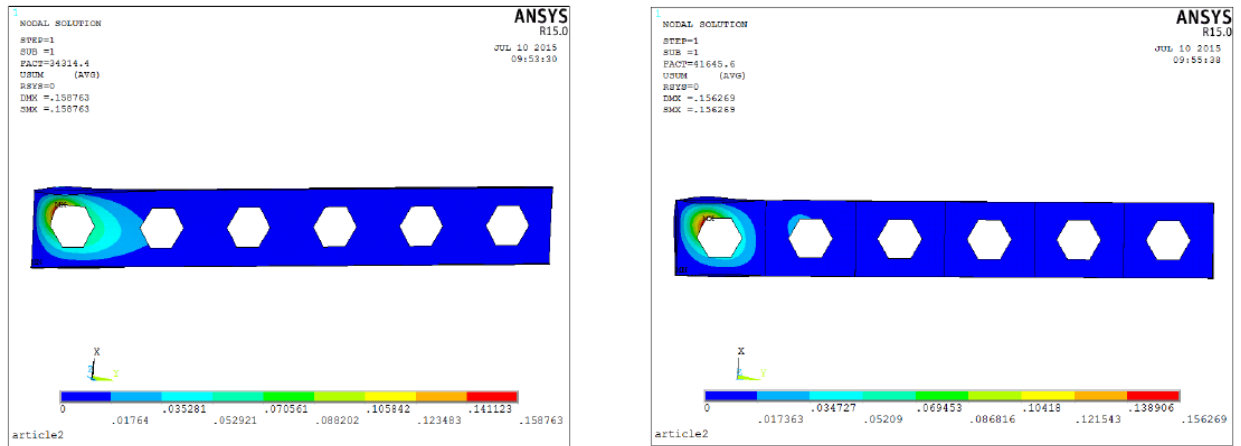


Figura 2.6 - Deformação da alma das vigas acasteladas com “razão de altura de vazio” de 0,520 com 6 furas sem e com enrijecedores (DENG et al., 2015).

Budi, Sukamta e Partono (2017) realizaram um estudo experimental e numérico utilizando o MEF por meio do *software* ABAQUS, e analisou a influência do ângulo da inclinação da abertura do alvéolo ( $\varphi = 50^\circ, 60^\circ$  e  $70^\circ$ ) e da distância entre os alvéolos ( $e = 6\text{cm}, 9\text{cm}$  e  $12\text{cm}$ ).

Os autores (BUDI; SUKAMTA; PARTONO, 2017) concluíram que a capacidade resistente máxima ocorreu no modelo com ângulo igual a  $60^\circ$  e distância entre aberturas de 6cm (relação entre a distância entre as aberturas e a altura da abertura na alma ( $e/h_0$ ) igual a 0,2857). A Figura 2.7 mostra os parâmetros geométricos de vigas de aço casteladas.

Dear Fontes Brenda,

We would like to **reiterate an important update** announced in **February 2025** regarding Canada's Express Entry system.

**Effective February 2025, Education occupations** have been **formally added to the list of eligible categories for Category-Based Selection** under Express Entry. Category-based rounds are intended to supplement other round types to meet the identified economic goal.

The updated list of eligible categories now includes:

- French-language proficiency
- Healthcare and social services occupations
- Science, Technology, Engineering and Math (STEM) occupations
- Trade occupations
- Agriculture and agri-food occupations
- **Education occupations (new addition)**

#### **Why You Should Start Now:**

- Faster Invitations: Priority processing for eligible occupations.
- Higher Selection Chances: More draws specifically targeting education professionals and other key sectors.
- Permanent Residency Pathway: Offers you and your family free healthcare, education, and a pathway to citizenship.
- Time-sensitive: The earlier you enter the pool, the better your chances of being picked in upcoming draws!

#### **How We Can Help:**

- Profile Assessment
- Express Entry and PNP Application Support
  - IELTS Training and ECA Guidance
- End-to-End Case Management by Licensed RCICs

Take the first step toward your Canadian dream!  
Our experts are ready to guide you through a smooth and successful application process.

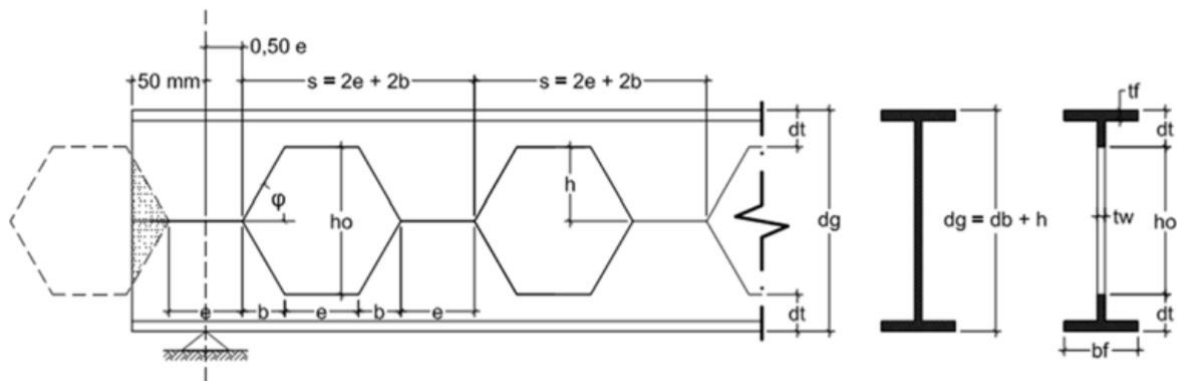


Figura 2.7 - Propriedades geométricas de vigas casteladas (BUDI; SUKAMTA; PARTONO, 2017).

Frans et al. (2017) também analisaram estes parâmetros utilizando o ABAQUS/CAE. Os resultados comprovaram que o ângulo da inclinação da abertura ( $\phi$ ) ideal é  $60^\circ$ , porém foi determinado que o trecho ótimo para a relação entre a distância entre as aberturas e a altura da abertura na alma do perfil ( $e/h_0$ ) que levam a maiores capacidades resistentes é entre 0,186 e 0,266.

Ponsorn e Phuvoravan (2020) fizeram um estudo sobre o comportamento da eficiente e a análise da modificação de uma viga original para uma viga acastelada e uma viga celular sob as diretrizes de projeto AISC (1999), onde concluíram que o padrão de corte de abertura ideal não pode ser definido em uma determinada forma típica, pois varia dependendo do comprimento da viga e da condição do sistema de vigas. Um comprimento de viga curto precisa de uma largura maior da abertura do alvéolo ( $e$ ) para maior eficiência na resistência à flambagem da alma, enquanto um comprimento de viga longo precisa de um valor  $e$  mais estreito para maior eficiência na resistência ao momento Vierendeel, e um comprimento de viga muito longo precisa de uma altura maior ( $h$ ), para maior eficiência na sustentação da deformação. O ângulo de corte de  $62^\circ$  proporciona a maior eficiência.

Pachpor et al. (2011) fez uma análise numérica e comparativa em vigas alveolares com furos circulares e hexagonais, e concluíram que a flecha em abertura circular é maior em comparação com aberturas hexagonais de mesma área, à medida que o número de aberturas aumenta, a deformação também aumenta para as mesmas condições de suporte. A tensão de Von Mises máxima também é menor na abertura circular em comparação com a abertura hexagonal da mesma área, e as deflexões e as tensões de Von Mises máximas aumentam à medida que o número de aberturas aumenta.



Gandomi et al. (2011) desenvolveram uma equação para calcular a capacidade de carga de vigas alveolares de aço utilizando o método GEP (Programação de Expressão Gênica), relacionando a capacidade de carga com as propriedades geométricas e mecânicas das vigas acasteladas, como mostra a equação (2.2).

$$\begin{aligned}
 P(kN) = & t_w \left( L \left( \frac{F_{yw} - B}{S} - L \right) + (t_w - 4)(t_w - LC) \right. \\
 & + \left. \sqrt[3]{(h_c + F_{yw})(F_{yw} - t_w - 216)} \right) - (t_f - LC)^2 \\
 & + \left( \sqrt[3]{t_f + h_c - 10} \right) \left( t_w^2 - \frac{S}{6} \right)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Onde:  $P$  (kN) é a capacidade de carga da viga alveolar;  $h_c$  (mm) é a altura geral;  $B$  (mm) é a largura da mesa;  $F_{yw}$  (MPa) é a tensão mínima de escoamento da alma;  $t_w$  (mm) é a espessura da alma;  $t_f$  (mm) é a espessura da mesa;  $S$  (mm) é a largura mínima da alma;  $L$  (m) é a extensão da viga acastelada; E  $LC$  é a variável indicadora que representa diferentes condições de carregamento.

Já Aminian et al. (2013) realizaram uma pesquisa com o objetivo de desenvolver uma nova equação de projeto para previsão da capacidade de carga de vigas alveolares de aço utilizando os sistemas *machine learning*. A formulação que apresentou melhores resultados foi utilizando LGP (Programação Genética Linear), equação (2.3).

$$\begin{aligned}
 V(kN) = & \frac{d_g - 3h - 5}{5} - \frac{1}{15 \frac{d_g}{e} - 180} \\
 & + \frac{1}{5} \left( \sqrt{\frac{d_g}{e}} \left( \frac{d_g}{15e} - \frac{4}{5} \right) + \frac{5t_w F_{yw} + d_g - h - 9}{45} \right)^2
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Onde:  $V$  (kN) é a capacidade de carga da viga alveolar utilizando *machine learning*;  $d_g$  (mm) é a altura total da viga acastelada;  $h$  (mm) é a projeção vertical do lado inclinado da abertura; E  $e$  (mm) é a largura da alma no meio da altura.

Jia et al. (2020) realizaram um estudo em vigas de aço com alvéolos hexagonais sob cargas cíclicas utilizando o *software* ABAQUS, e observaram que antes da flambagem das vigas, há

pouca diferença na rigidez inicial dos membros com ou sem as nervuras de reforço transversais. Após a deformação por flambagem, a capacidade de suporte e a capacidade de deformação dos membros com as nervuras de reforço transversais melhoram significativamente. Quanto maior for a relação altura-espessura do membro, mais significativo se torna o efeito das nervuras de enrijecimento.

Além das vigas com alvéolos hexagonais, existem também as vigas com alvéolos circulares. O processo de fabricação é o mesmo, no entanto, existem especificações diferentes para as dimensões dos alvéolos.

As vigas celulares, com aberturas circulares, podem apresentar diversas combinações de diâmetro de aberturas e distância entre centros de abertura (Figura 2.8). De acordo com o documento da patente (WALKER, 1990), o padrão celular é definido pelas seguintes proporções:

- A razão entre o diâmetro da abertura e a altura da viga expandida é igual a 0,67 ( $e_1 = D_0/d_g = 0,67$ );
- A razão entre o passo e o diâmetro de abertura é igual a 1,25 ( $e_2 = p/D_0 = 1,25$ ).

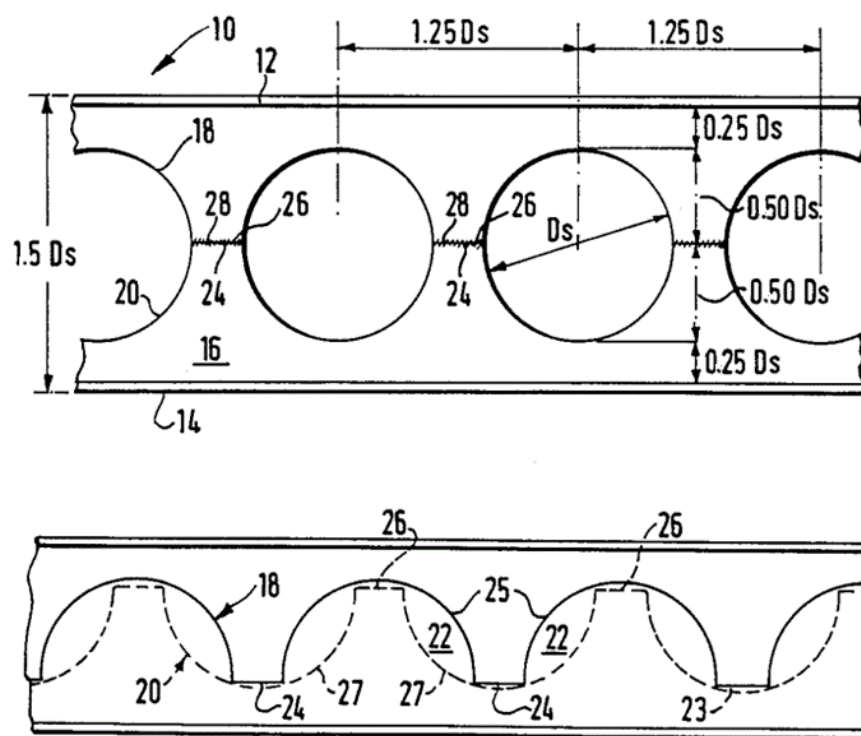


Figura 2.8 - Viga celular circular apresentada na patente britânica nº 4894898 (WALKER, 1990).

O documento também menciona outras variações do padrão de corte celular, como a viga de inércia variável, a viga com aberturas circulares alongadas vertical ou horizontalmente, e as vigas híbridas, com parte do corte reto e parte em arco (SILVEIRA, 2011).

Durante o processo de corte, ocorre uma perda de material nas áreas intermediárias entre os segmentos de corte reto e em arco. É necessário cuidado especial com o esmerilhamento na região do corte reto (Figura 2.9), sendo o ideal o corte ser a laser, pois esta será responsável pela união horizontal entre os segmentos cortados da viga.

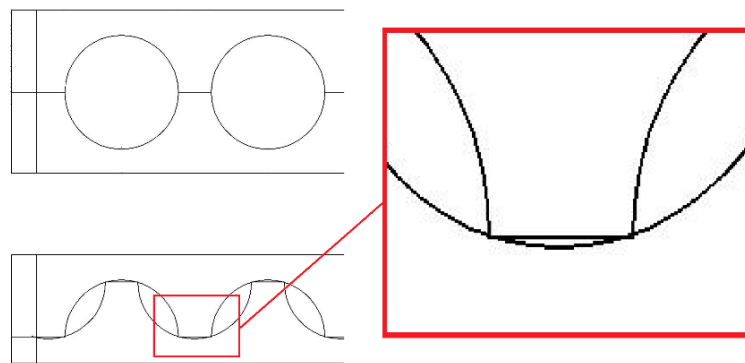


Figura 2.9 - Detalhe do corte para alvéolos circulares.

Usualmente, as dimensões dos alvéolos circulares apresentam valores que ficam dentre de certos limites que garantem o bom resultado de viga (HARPER, 1994), esses limites estão ilustrados na Figura 2.10.

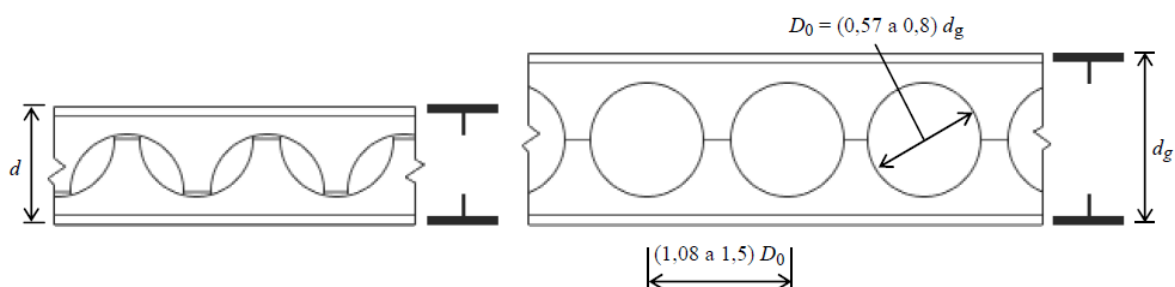


Figura 2.10 - Propriedades geométricas de vigas celulares (HARPER, 1994).

Onde:  $d$  é a altura do perfil de alma cheia;  $d_g$  é a altura da viga celular;  $D_0$  é o diâmetro do alvéolo.

### 2.3 VIGA MISTA DE AÇO-CONCRETO

As vigas mistas resultam da associação de uma viga de aço com uma laje de concreto ou mista, utilizando conectores de cisalhamento geralmente soldados à mesa superior do perfil metálico. Esse tipo de viga costuma apresentar uma resistência superior em comparação às vigas de aço simples, com um aumento relativamente pequeno nos custos.

O conector *stud bolt*, ou pino com cabeça, foi desenvolvido na década de 1940 pela *Nelson Stud Welding*, é o mais largamente utilizado pela indústria da construção civil (BARBOSA, 2016). Este conector é composto por um pino especialmente desenvolvido para atuar tanto como

eletrodo de soldagem a arco quanto como conector de cisalhamento após a soldagem, que possui cabeça com dimensões padronizadas para cada diâmetro. A Figura 2.11 mostra os detalhes do conector *stud bolt*.

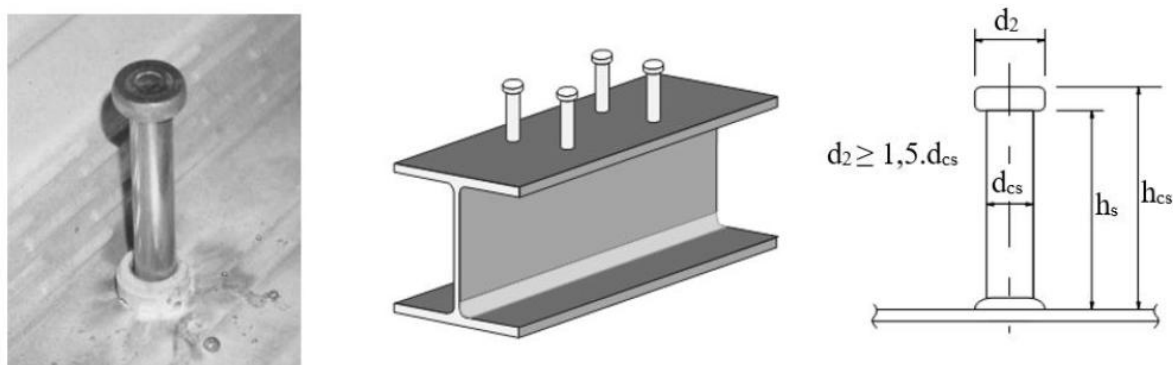


Figura 2.11 - Detalhes do conector *stud bolt* (VERÍSSIMO, 2007).

As vantagens dos conectores *stud bolt* podem ser resumidas da seguinte forma: soldagem rápida, boa ancoragem no concreto, fácil disposição do reforço através da laje, produção em grande escala é fácil, cabeça dimensionada padrão é um fator de resistência para elevação da laje e são práticos para uso em lajes de aço (MAHDI et al., 2012).

No entanto, para a utilização desse tipo de conector, é necessário usar uma pistola de solda específica que demanda um gerador próprio (BARBOSA, 2016). Essa pistola de solda tem um alto custo de aquisição, além do gerador ter a necessidade de uma boa infraestrutura de energia no canteiro de obras, o que aumenta o custo de execução, podendo até inviabilizar o projeto (VERÍSSIMO, 2007).

Além disso, o *stud bolt* é um conector flexível, não sendo recomendado para situações onde a sobrecarga de utilização (variável) represente grande parcela do carregamento total, o que leva ao comprometimento do sistema misto por conta da fadiga (CRUZ et al., 2006). Mahdi et al. (2012), dizem ser desaconselhável o emprego deste conector em sistemas mistos com concretos classe C30 ou superiores, porque a resistência destes passa a ser governada pela resistência da seção transversal do *stud*.

Cavalcante (2010) desenvolveu uma tese de doutorado sobre o estudo numérico e experimental de conectores de cisalhamento do tipo 'v' em viga mista e comparou com o modelo *stud bolt*. Com base no estudo numérico, foi concluído que no conector *stud* as fissuras se iniciam em torno de cada conector e se propagam em direção aos demais. Inicialmente, as fissuras dos

conectores se interpõem com as existentes advindas dos conectores adjacentes. Em seguida estas fissuras alcançam os que estão mais a frente, na direção do alinhamento da viga metálica. De acordo com o estudo experimental, foi percebido que a altura do conector influencia o resultado do ensaio de *push-out*. Os conectores de maior altura mostraram maior deslizamento do perfil em relação à laje. O menor nível de ligação destas peças pode ser devido à posição de atuação dos esforços no conector. Conectores de maior altura têm seu ponto de aplicação de carga mais elevado, possibilitando maiores momentos fletores atuantes no conector.

Ali e Zhixiang (2010) estudaram os efeitos da conexão de cisalhamento parcial em vigas de aço-concreto sujeitas à flexão por MEF utilizando o *software* ABAQUS. A modelagem numérica foi feita considerando a condição de contorno simplesmente apoiada, onde uma extremidade da viga de aço foi descrita para restringir seus deslocamentos translacionais U1, U2 e U3 com o apoio da outra parte apenas com U2 e U3. Para a condição de restrição, cada um dos apoios terminais foi limitado por seus deslocamentos translacionais U2 e U3 para evitar a torção da laje de concreto. Foi assumido que não houve deslizamento entre o concreto e o aço de reforço durante a análise. Portanto, o método de restrição embutido foi usado no modelo.

Para definir a relação de interface entre o aço e o concreto, uma relação de conexão "*hard*" foi usada para reduzir a penetração do contato na superfície principal e para evitar a transferência de tensão de tração através da interface, com a propriedade de contato sem atrito. O método de risco modificado foi usado com o método padrão Newton-Ra Hone no ABAQUS para resolver problemas não lineares e para rastrear a curva carga-deformação não linear deste trabalho. A laje de concreto foi modelada em malha com elementos de 100mm, os conectores de cisalhamento 20mm e a viga de aço com 20mm.

Com base no modelo elaborado, os autores (ALI; ZHIXIANG, 2010) concluíram que o comportamento da resistência parcial foi mostrado no modelo com a diferença na resistência máxima à flexão das vigas mistas de aço-concreto CBF-1 e CBP1. Um deslizamento longitudinal da interface do modelo foi observado para as vigas mistas de aço-concreto FSC e PSC.

Tan e Uy (2011) desenvolveram e validaram um modelo 3D em MEF no ABAQUS para simular o comportamento de lajes retas de concreto, vigas retas de aço, vigas mistas de aço-concreto retas e curvas submetidas à flexão e torção combinadas com a influência da ligação

de cisalhamento parcial (Figura 2.12). O modelo comprovou que, devido à torção das vigas mistas aço-concreto, diferentes curvaturas para a viga de aço e laje de concreto ocasionalmente ocorriam quando a torção era apresentada, fenômeno é conhecido como deslizamento vertical induzido por torção.

Com base no estudo paramétrico realizado pelos autores, perceberam que a taxa de aumento da resistência à torção dependeu da localização da linha neutra e do comprimento do vão para as vigas mistas retas de aço-concreto. Para as vigas mistas aço-concreto curvas em plano, esse índice aumentou com o aumento do comprimento do vão. No entanto, tanto para vigas retas quanto curvas em vigas mistas planas de aço-concreto, não houve impacto significativo da redução do nível de conexão de cisalhamento às suas relações de razão de interação resistência máxima.

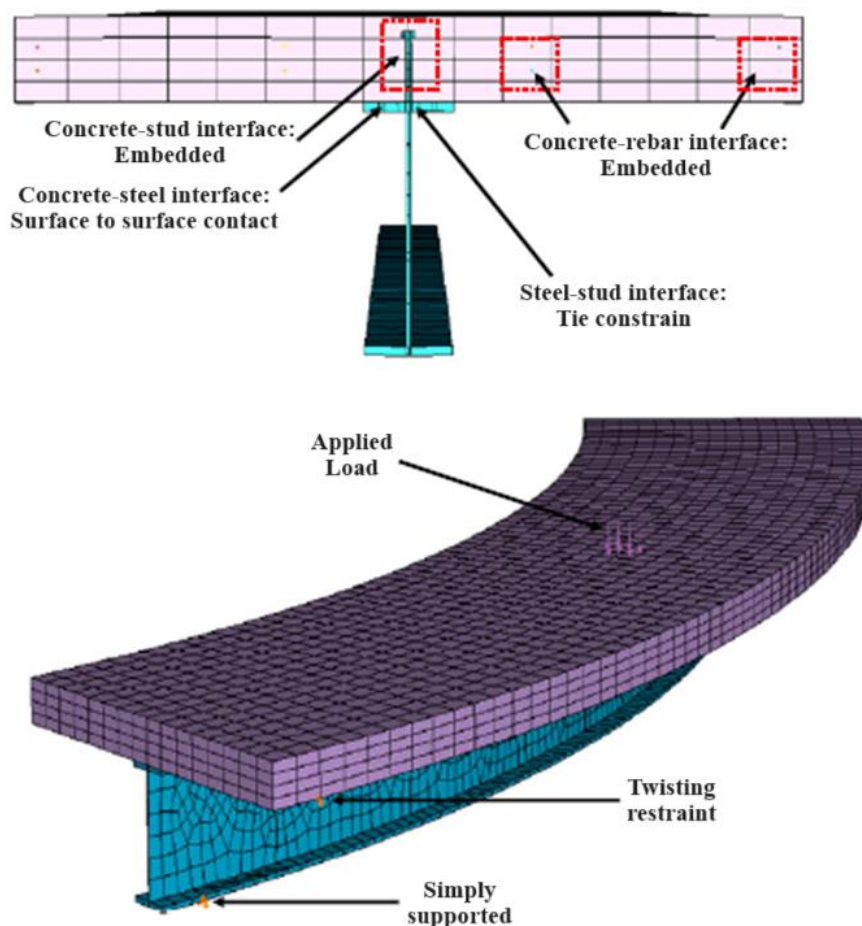


Figura 2.12 - Interações de contato e condições de contorno para a modelagem de elementos finitos (TAN; UY, 2011).

Xing et al. (2016) realizaram ensaios de flexão e simulação numérica, utilizando o ABAQUS, foram conduzidos para investigar o comportamento estático de vigas mistas de aço e concreto elástico (concreto com enchimento de borracha) conectadas parcialmente ao cisalhamento. Os autores concluíram que maior grau de conexão de cisalhamento pode alongar o estágio elástico e retardar o desenvolvimento e propagação do deslizamento, mas levar a uma diminuição da ductilidade em 26%. Com o mesmo grau de conexão de cisalhamento, pinos maiores de 22 mm podem causar capacidade de carga final 9% menor e uma deformabilidade e ductilidade ainda piores.

Mesquita et al. (2016) realizaram uma pesquisa sobre os aspectos relevantes sobre a modelagem computacional de vigas mistas de aço e concreto, comparando os tipos de esforços na interface aço-concreto utilizando o *software* ABAQUS. Foi modelada uma viga mista convencional biapoiada com 12 metros de comprimento, perfil de aço tipo IPN 400 e laje de concreto maciça com 200 mm de espessura e 600 mm de comprimento, aplicando um carregamento distribuído de 16,70 kN/m. O aço foi representado com comportamento *Elasticity* e *Plasticity*, e o concreto foi modelado com comportamento *Elasticity* e *Concrete Damage Plasticity*.

Os meios de conexão na interface aço-concreto foram simulados utilizando os elementos de conexão do tipo CONN3D2 com a opção *Slide-plane*, para representar o movimento translacional dos nós conectados, e a opção *Align*, para caracterizar o movimento rotacional. Foram utilizados elementos sólidos tridimensionais do tipo C3D8, que possui oito nós e três graus de liberdade por nó.

A partir dos resultados de Mesquita et al. (2016), observa-se que o modelo numérico teve resultados semelhantes ao modelo analítico, validando o tipo de interface aço-concreto utilizada. Além disso, nota-se que a viga apresenta uma condição de interação parcial, uma vez que, as flechas obtidas pelo modelo computacional são superiores às flechas obtidas pelo modelo com interação completa e inferiores às flechas encontradas para a situação em que o perfil de aço e a laje de concreto trabalham isoladamente (ausência de interação), como mostra a Figura 2.13.



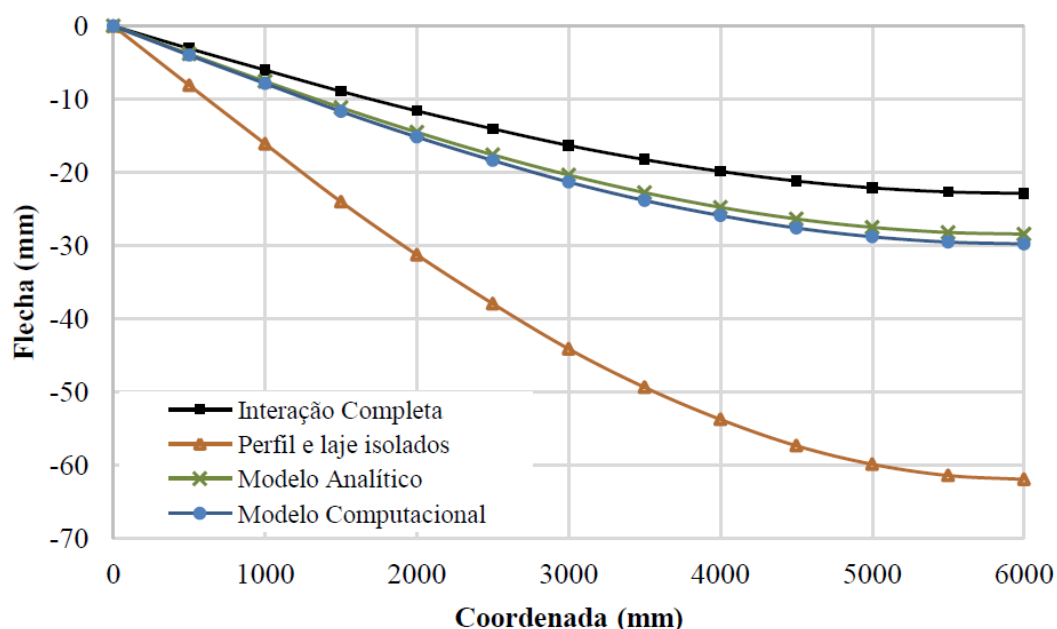


Figura 2.13 - Resultados obtidos para viga mista convencional (MESQUITA et al., 2016).

Bezerra et al. (2018) desenvolveram um novo tipo de conector de cisalhamento, em formato “V”, como alternativa para o conector do tipo *stud bolt*. O conector V tem uma área de contato maior que aumento a resistência às forças de cisalhamento e a um momento de inércia muito alto, quando comparado aos *stud bolts* comumente aplicados. Foi feita uma modelagem numérica no *software* ABAQUS/Explicit com procedimento dinâmico, considerando a não linearidade do aço e do concreto.

O aço foi modelado com a propriedade *PLASTIC*, considerando fluxo de plasticidade e escoamento isotrópico para representar o comportamento do material no espaço tridimensional de tensões. O concreto foi modelando considerando o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) disponível na biblioteca do *software* (ABAQUS, 2014), onde o modelo CDP segue a regra de fluxo de plasticidade não associada, em que a função de potencial plástico e a superfície de escoamento não coincidem.

Para calibração, diferentes parâmetros devem ser definidos no modelo CDP. O ângulo de dilatação do material ( $\psi$ ) e a excentricidade ( $\epsilon$ ) são tomados como  $13^\circ$  e 0,1, respectivamente. A razão da resistência à compressão biaxial para a resistência à compressão uniaxial ( $f_{b0}/f_{c0}$ ) é considerada como sendo 1,16, a razão  $K_c$  é considerada como sendo 0,7, e o parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ) para ser 0,0.

A carga foi aplicada de forma dinâmica devagar, para minimizar os efeitos da inércia. Elementos de dois nós (T3D2) são usados para modelar as barras de armadura. Elementos de oito nós (C3D8R) são considerados para modelar os conectores de cisalhamento, viga de aço e laje de concreto. As barras de aço da armadura são modeladas embutidas na laje de concreto usando a opção *ELEMENTO EMBEDDED* no ABAQUS e foi utilizada a opção *TIE CONSTRAINT* para considerar um comportamento rígido entre o conector de cisalhamento e a laje de concreto. Os elementos e malhas foram ilustrados na Figura 2.14.

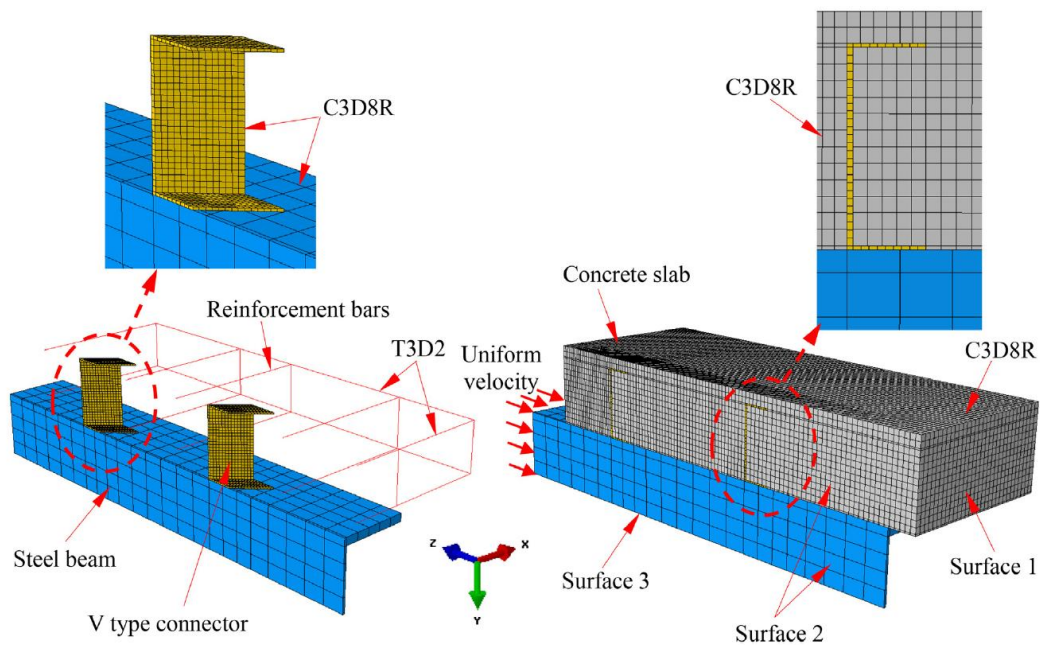


Figura 2.14 - Elementos do modelo no ABAQUS (BEZERRA et al., 2018).

No artigo elaborado por Kostic e Deretic-Stojanovic (2018), foi apresentada a análise não linear de fibras para seções transversais de vigas mistas aço-concreto com conectores não-dúcteis e conexão de cisalhamento parcial. Foram estudados os seguintes efeitos: método de construção, variação da classe do concreto, variação da classe do aço, presença de armadura da laje e fluência na laje de concreto. Nove geometrias de seção transversal diferentes são incluídas na análise.

Para o método de construção escorada, os resultados mostraram que a maior diferença entre a aproximação não linear e a bi-linear da relação entre a resistência do momento fletor e o grau de união ao cisalhamento chega a 26%. Portanto, tendo em mente a simplicidade da relação bi-linear, este método é de precisão aceitável para aplicação prática. No entanto, para desproporcionado depende do valor do momento fletor aplicado somente na seção de aço.

Quanto maior o momento fletor aplicado na seção de aço, maior o erro. Portanto, os resultados do método aproximado podem ser excessivamente conservadores para estruturas desproporcionais.

No que se refere à variação das propriedades do material, o estudo mostrou que as propriedades do aço de construção (limite de escoamento) têm influência mais significativa no momento de resistência à flexão do que a resistência da laje de concreto. Além disso, o estudo mostrou que a armadura da laje pode ser ignorada na determinação da resistência ao momento fletor de flacidez.

Rossi et al. (2020) fizeram um estudo, por meio do desenvolvimento de análises numéricas não lineares físicas e geométricas refinadas com o *software* ABAQUS, que investiga a resistência de vigas mistas aço-concreto sob a ação de momento negativo. Pode-se concluir que a seção transversal e a presença de enrijecedores de alma são os parâmetros que mais influenciam na resistência da flambagem distorcional lateral. Segundo os autores (ROSSI et al., 2020), verificou-se que quando solicitadas em momento negativo, as vigas mistas aço-concreto podem romper devido à ocorrência de flambagem distorcional lateral, modos de estabilidade local, ocorrência simultânea desses dois modos de estabilidade ou pelo comportamento plástico do elemento.

## 2.4 VIGA DE AÇO PROTENDIDA

Assim como as vigas de concreto protendido, as vigas de aço também podem ser protendidas.

Segundo Nelsen e Souza (2012), a protensão externa, ou seja, quando os cabos não são envolvidos por concreto, apresenta diversas vantagens, entre elas: a facilidade de inspeção e manutenção durante e após a protensão, facilidade na substituição do cabo quando necessário, além do traçado mais simples dos cabos e os detalhes construtivos simplificados. No entanto, esse mesmo sistema apresenta algumas desvantagens, geralmente relacionados à exposição dos cabos.

Uma estrutura protendida pode ter seus cabos com diferentes tipos de traçados, e o formato desse traçado é uma variável relevante no comportamento estrutural da peça (TROITSKY,

1990). Com ajuda dos desviadores presentes na peça, o formato do traçado dos cabos se altera e proporciona diferentes eficácias ao sistema de protensão, como mostra o estudo de Belletti e Gasperi (2010). O objetivo geral da protensão é atuar em sentido oposto aos esforços que são produzidos pelos carregamentos externos, logo, é necessário que o traçado seja projetado em função das cargas atuantes no elemento.

Ferreira (2007) estudou o comportamento de vigas metálicas protendidas, com perfil tipo “I” e desenvolveu um aplicativo utilizando o *software* Microsoft Excel. Foram feitas duas análises, a primeira sendo uma viga com traçado poligonal para os cabos de protensão e a segunda uma viga com cabos de traçado reto localizados abaixo da mesa inferior, de forma a aumentar a excentricidade e o poder de contrabalancear os carregamentos externos. Também foi feita uma análise numérica utilizando o *software* ANSYS nas mesmas condições do aplicativo.

Em ambos os modelos, nenhuma das vigas resistiria aos carregamentos externos sem a aplicação da protensão. Houve uma pequena diferença entre os valores encontrados pelo aplicativo desenvolvido e pela modelagem numérica, essa diferença se dá pelo fato de que na análise de elementos finitos a força de protensão é mantida constante ao longo de todo o cabo, não é levada em consideração a perda de protensão, que ocorre de maneira diferenciada em cada trecho, entre os desviadores.

Segundo Ferreira (2007), deve-se ter atenção com relação à possível instabilidade gerada pela força axial de compressão na peça, logo, devem ser providos os travamentos laterais quando necessários.

Além disso, foi feito um estudo para a obtenção da resposta dinâmica da viga metálica protendida após o rompimento brusco e simultâneo dos cabos de protensão. Foi concluído que no exemplo 1 (Figura 2.15), o cabo de traçado poligonal sofreu perda de estabilidade, deslocando lateralmente, quando o cabo resultante de um dos lados foi rompido. No exemplo 2, com cabos retos, a quebra das cordoalhas foi decorrente da redução da força de protensão aplicada à estrutura. Também foi concluído que a viga passa a oscilar em torno da posição inicial ( $u=0$ ), com amplitude de deslocamentos positivas e negativas, após o rompimento dos cabos de protensão. Os resultados dinâmicos obtidos no aplicativo foram compatíveis com os resultados do ANSYS.

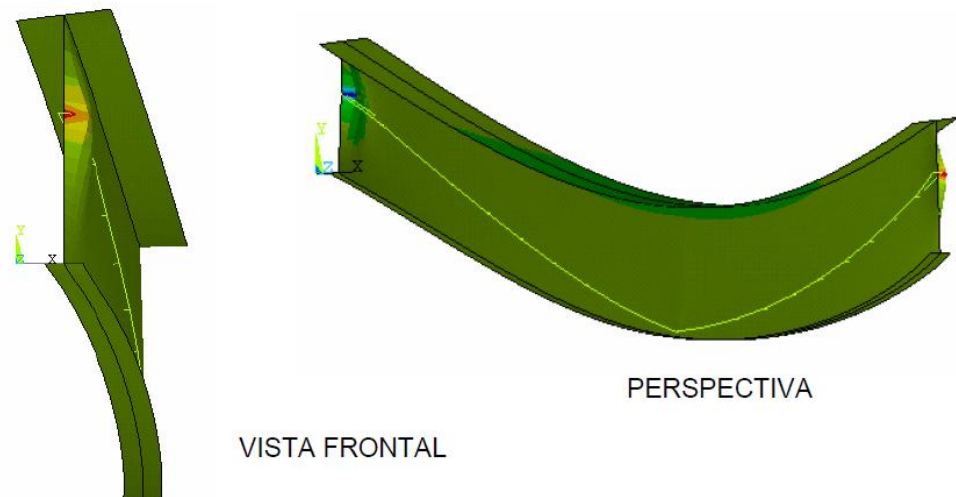


Figura 2.15 - Comportamento da viga do exemplo 1 após simulação da ruptura do cabo de protensão de um dos lados da viga (FERREIRA, 2007).

Belletti e Gasperi (2010) estudaram o comportamento de vigas metálicas protendidas no em modelagem numérica utilizando o *software* ABAQUS com foco na quantidade desviadores. As análises não-lineares de elementos finitos foram realizadas no controle de carga adotando o método de Newton como critério de convergência. Isso significa que a capacidade da viga foi identificada em correspondência com o valor de pico da carga aplicada correspondente à última solução convergente, mostrado que a convergência falha após o escoamento do aço, em correspondência com altos níveis de deformação. Mesmo que valores mais altos de deslocamento possam ser alcançados com técnicas de solução mais refinadas, nenhum aumento significativo nas cargas aplicadas pode ser obtido; além disso, valores mais altos de deformação não são relevantes para este estudo porque não podem ser aceitos na prática.

Gaykar (2013) em seu estudo de vigas de aço protendidas concluiu que número de desviadores e a força de protensão são parâmetros críticos no dimensionamento de vigas metálicas protendidas de médio vão. Principalmente devido à mitigação da flambagem e consequentemente, graças ao maior valor da força de protensão que pode ser aplicada, a capacidade de carga vertical aumenta com o número de desviadores. Para soluções práticas, não é recomendado impor a forma das armaduras por apenas dois desviadores. De fato, para vigas com dois desviadores, podem ser aplicados os menores valores de força de protensão e os menores valores de capacidade de carga vertical podem ser alcançados. Além disso, a forma deformada de uma viga com dois desviadores é caracterizada no meio do vão por uma diminuição da distância entre os cabos e o eixo da viga à medida que a carga aumenta; esse

fenômeno causa uma perda na excentricidade do cabo e, conseqüentemente, uma perda na capacidade de carga vertical da viga.

Ponnada e Vipparthy (2017) estudaram sobre os parâmetros ideais para a economia de uma viga de aço protendida, tendo como objetivo determinar as dimensões ótimas de uma viga I de aço protendida simplesmente apoiada, lateralmente não apoiada, para um dado vão e capacidade de carga. O vão da viga foi limitado a 12 m, enquanto a capacidade de carga foi limitada a 100 kN/m neste estudo. Uma configuração de cabo de protensão reto em toda a extensão é considerada e as perdas que ocorrem nos cabos são desprezadas. O conjunto com área de seção transversal mínima é escolhido. Observou-se que a relação entre a tensão da fibra superior nas cargas de trabalho e a tensão admissível é superior a 0,9 para todos os vãos das seções transversais finalizadas. Isso significa que a seção transversal está sendo efetivamente utilizada. Para uma dada capacidade de carga e amplitude, a razão entre a excentricidade e a altura deve estar entre 0,45 e 0,7 para uma utilização ideal da seção transversal disponível. Observa-se também que pode ser aplicada a força máxima de protensão igual a 0,25 vezes a tensão de compressão de flexão permitida.

Para uma dada capacidade de carga, a força máxima de protensão que pode ser aplicada diminui com o vão. A protensão permite vãos mais longos para a mesma carga quando comparada a vigas de aço não protendidas do ponto de vista da flecha. No caso de vigas de aço simplesmente apoiadas e sujeitas a cargas aplicadas gradativamente, a fibra superior atinge a tensão máxima permitida antes da mesa inferior. Para seções ótimas, a relação entre a tensão da fibra inferior na transferência e a tensão permissível para diferentes vãos varia de 0,6 a 1,0.

Ribeiro (2018) estudou o comportamento de vigas metálicas protendidas por cabos externos, analisando as diversas variáveis em modelos analíticos em *softwares* de elementos finitos. Além disso, foram realizados ensaios experimentais de vigas metálicas protendidas para avaliar as dificuldades práticas da execução da técnica de protensão e analisar o comportamento da viga protendida, comparando os resultados entre as análises numérica e experimental.

A viga protendida foi modelada de forma isostática, biapoiada. Para a simulação dos apoios no modelo, as duas faces de extremidade da viga foram impedidas de deslocamentos na vertical (Figura 2.16). Em uma das faces, a extremidade inferior foi impedida de deslocamento

horizontal e, para a simulação do travamento lateral, foi impedido o deslocamento transversal do nó central, sendo os cabos conectados a viga por ligação tipo *tie*.

A aplicação da protensão no cabo foi feita com uma ferramenta do ABAQUS para a aplicação de cargas em parafusos (*bolt load*), como mostra a Figura 2.17. E, foi aplicado a uma seção transversal do cabo em cada lado da viga, um valor para carga de protensão de 8 toneladas, simulando o ato de protensão na viga (Figura 2.18).

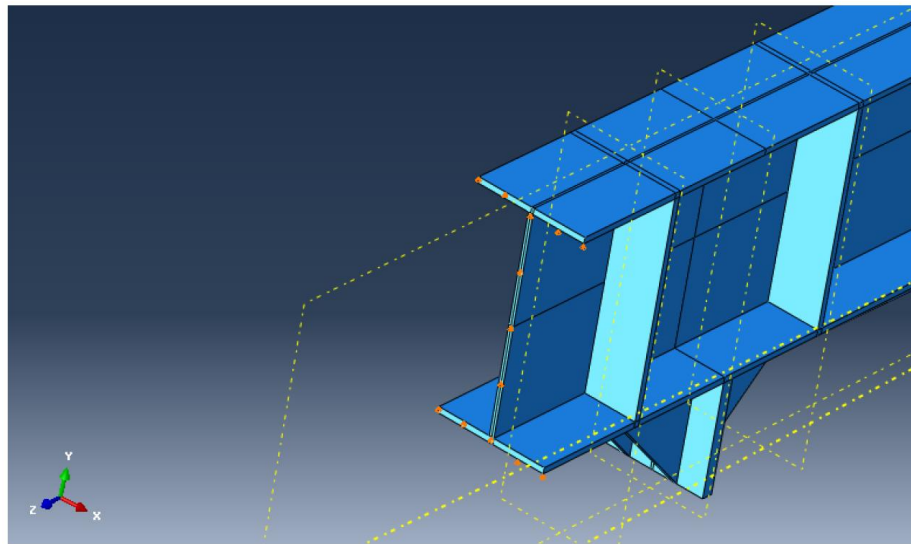


Figura 2.16 - Condição de contorno para o modelo em uma das extremidades (RIBEIRO, 2018).

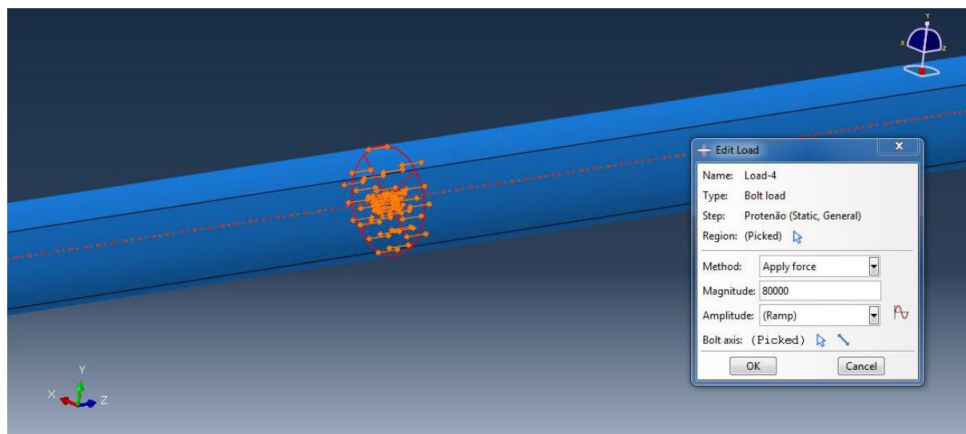


Figura 2.17 - Aplicação da força de protensão a seção transversal do cabo (RIBEIRO, 2018).

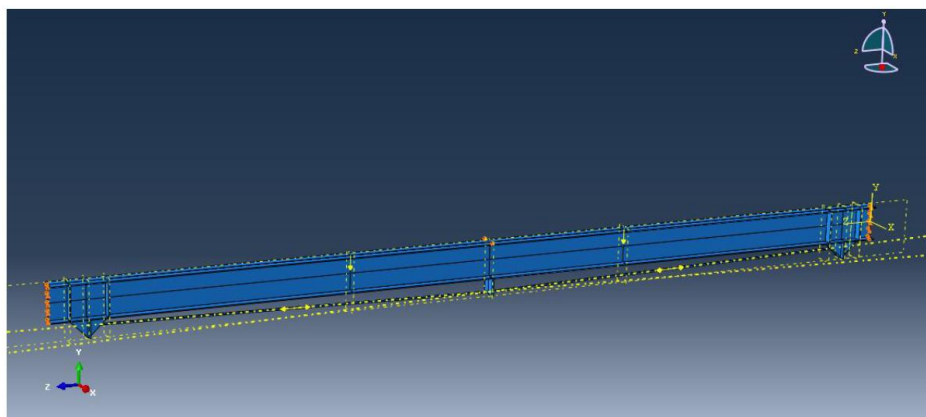


Figura 2.18 - Modelo de viga com protensão enfatizando a aplicação das cargas no ABAQUS (RIBEIRO, 2018).

Com os resultados obtidos no modelo numérico, foi possível observar o comportamento de tensões na viga e nas chapas de ancoragem garantindo a eficiência do sistema de ancoragem para a execução do ensaio.

Segundo Ribeiro (2018), o sistema representou uma redução de 37% no peso de aço utilizado para uma mesma área comparada a utilização normal das vigas metálicas mistas. Além da redução com a utilização do sistema, não é necessário a utilização de escoras para as vigas, permitindo uma economia direta e uma redução do tempo final de obra. Porém, é importante ressaltar que esta redução de aço não representa uma economia direta deste valor, são necessários: o acréscimo do custo da protensão; o aumento no custo da produção e outros fatores como tempo de execução da protensão.

Fanaie, Partovi e Faegh (2021) desenvolveram relações teóricas para calcular o aumento da força de pré-tensionamento de cabos sob carregamento externo com base no método do menor trabalho, bem como a flecha de vigas de aço com diferentes condições de apoio e padrões de cabos com base no método de trabalho virtual e comparou com a modelagem numérica utilizando o *software* ABAQUS, analisando vigas de aço protendidas vigas simplesmente apoiadas, bem como vigas apoiadas fixas, são protendidas com padrões em forma de V e em forma de V modificados do cabo (Figura 2.19). Os autores concluíram que o deslocamento é menor nas vigas simplesmente apoiadas e fixas apoiadas junto com o padrão de cabo em forma de V modificado, em comparação com o padrão em forma de V. Portanto, o padrão de cabo em forma de V modificado é recomendado como mais apropriado. Com base nos diagramas de momento fletor obtidos para vigas simplesmente apoiadas sem cabo e com cabo, conclui-se que



se o cabo partir do eixo neutro em cada apoio, o momento fletor da viga simplesmente apoiada com cabo não aumentará em comparação com o simplesmente viga apoiada sem cabo.

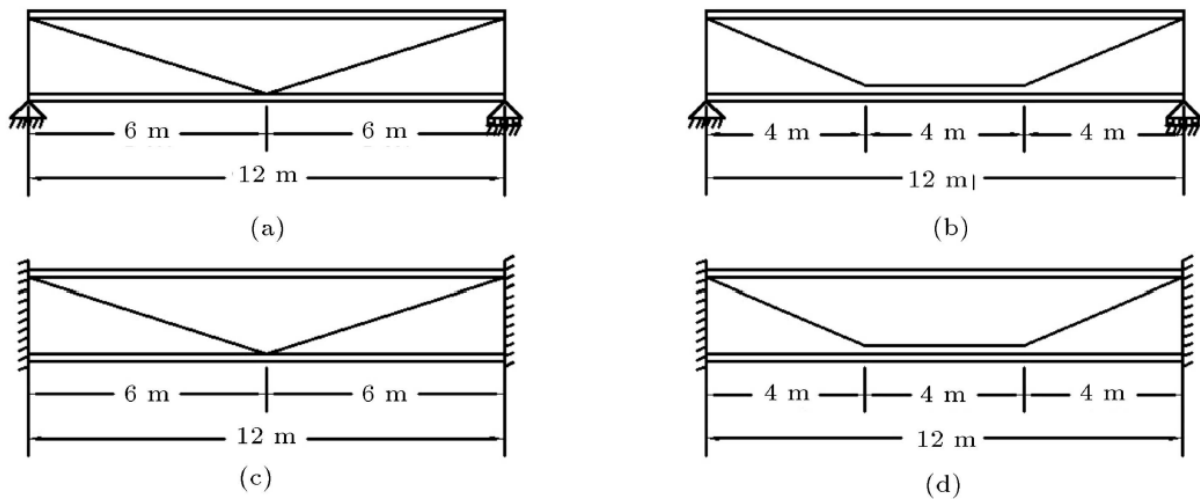


Figura 2.19 - As localizações dos cabos nas vigas: (a) Viga simplesmente apoiada junto com o padrão de cabo em forma de V, (b) Viga simplesmente apoiada junto com o padrão de cabo em forma de V modificado, (c) Viga apoiada fixa junto com o padrão de cabo em forma de V, e (d) viga suportada fixa junto com o padrão de cabo em forma de V modificado (FANAIE; PARTOVI; SAFAEI FAEGH, 2021).

Jardim et al. (2021) fizeram um estudo analisando o comportamento de uma viga de aço quando submetida a protensão, em diferentes fases de aplicação utilizando o *software* ANSYS. Concluíram que a compressão proveniente da protensão é um esforço importante para o equilíbrio do sistema estrutural durante sua protensão, quando se verifica a interação dos esforços e que para elementos estruturais de grandes comprimentos, o deslocamento é um fator preponderante na avaliação estrutural.

O aumento da rigidez da viga de aço é diretamente proporcional à força de protensão e é inversamente proporcional ao quadrado do comprimento do vão da viga (JIA; LIANG, 2011).

Para analisar o efeito que a protensão tem na frequência de natureza da viga simplesmente apoiada, Liu et al. (2013) elaboraram um trabalho que utiliza o método dos elementos finitos e estabelece o modelo sob diferentes protensão e com diferentes arranjos do aço protendido, para analisar o modal de protensão da viga de aço protendida. Os resultados da análise mostram: colocando o aço protendido ao longo do centroide da área da viga, a frequência fundamental da viga de aço aumenta em não linearidade quadrática com o aumento do pré-esforço. Com o mesmo arranjo de excentricidade, a frequência de natureza da viga de aço aumenta com o

aumento da protensão. Sob ela, a frequência de natureza da viga de aço aumenta com o aumento da excentricidade do aço protendido (Figura 2.20).

Prestress value (KN)	Eccentricity (m)							
	0		0.025		0.05		0.075	
	frequency (Hz)	frequency change rate	frequency (Hz)	frequency change rate	frequency (Hz)	frequency change rate	frequency (Hz)	frequency change rate
0	45.35	0.00%	45.47	0.26%	45.82	1.04%	46.37	2.25%
2	45.45	0.22%	45.59	0.53%	45.91	1.23%	46.48	2.49%
4	45.66	0.68%	45.79	0.97%	46.17	1.81%	46.61	2.78%
6	45.95	1.32%	46.09	1.63%	46.4	2.32%	46.87	3.35%
8	46.36	2.23%	46.48	2.49%	46.8	3.20%	47.31	4.32%
10	46.68	2.93%	46.8	3.20%	47.11	3.88%	47.61	4.98%
12	47.05	3.75%	47.17	4.01%	47.47	4.67%	47.94	5.71%
14	47.52	4.79%	47.63	5.03%	47.9	5.62%	48.34	6.59%
16	48.12	6.11%	48.23	6.35%	48.46	6.86%	48.84	7.70%
18	48.9	7.83%	49	8.05%	49.17	8.42%	49.47	9.08%
20	49.9	10.03%	49.98	10.21%	50.08	10.43%	50.27	10.85%

Figura 2.20 - Tabela da frequência natural da viga de aço submetida a diferentes pretensões e com diferentes excentricidades (LIU et al., 2013).

## 2.5 VIGA MISTA ALVEOLAR

As vigas mistas alveolares de aço e concreto são fruto da associação de um perfil com aberturas sequenciais na alma a uma laje de concreto ou mista por meio de conectores de cisalhamento. A viga resultante poderá vencer vãos ainda maiores que a viga mista convencional, pois há um acréscimo considerável de rigidez proporcionado pelo aumento da altura total do perfil com aberturas e, conseqüentemente, do sistema laje-viga.

Hartono e Chiew (1996) fizeram investigações numéricas e experimentais sobre vigas mistas semi-acasteladas e concluíram que a ruptura final das vigas ocorre pela flambagem do primeiro pilar da alma a partir do suporte, independentemente do comprimento do vão. Quando comparando os resultados do modelo com o comportamento misto da viga com a laje de concreto, perceberam que a diferença entre as curvas de deslocamento x carga pode ser devido à suposição de aderência perfeita entre o concreto e o aço na modelagem numérica. Além disso, comprovaram que a incorporação da laje de concreto no projeto da viga permitiu resultado mais econômicos e precisos.

Cavalcante (2005) desenvolveu um estudo das tensões na solda da alma de vigas de aço alveolares em estruturas mistas, pois as vigas alveolares possuem tensão normal de flexão nula

no centroide onde se localiza a linha de solda, no entanto esta situação não é verificada quando tal viga é usada em conjunto com a laje de concreto como ocorre em vigas mistas.

Com relação a geometria do furo (Figura 2.21), constatou-se que o aumento do cordão de solda não reduz de forma significativa o valor da tensão máxima atuante na solda, apenas uma mudança de posicionamento do ponto de máxima tensão solicitante, ou seja, o aumento do cordão de solda possibilita o surgimento de concentrações de tensão nos vértices do hexágono, enquanto a sua redução implica em concentrações de tensão no centro da solda. E concluiu que o hexágono que apresenta os melhores resultados, é aquele sugerido por Cimadevila, Gutiérrez e Rodriguez (2000) onde suas medidas atendem as seguintes recomendações da equação (2.4).

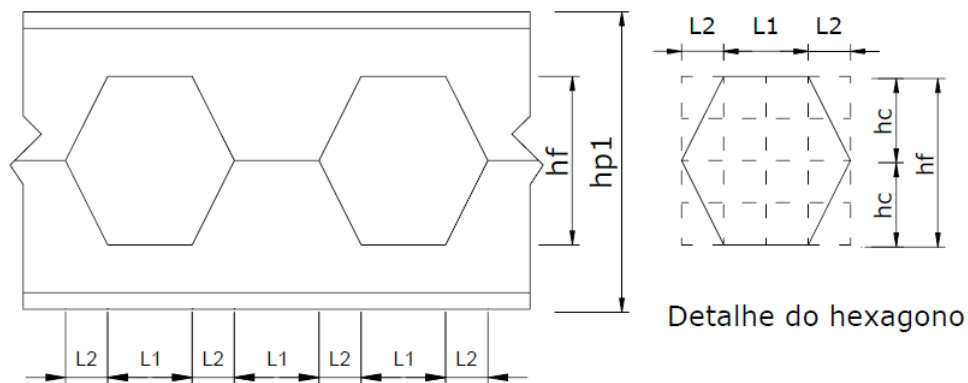


Figura 2.21 - Detalhe do hexágono (CAVALCANTE, 2005).

$$L_1 = 2 \cdot L_2 = \frac{h_f}{2} \quad (2.4)$$

Gizejowski e Salah (2011) investigaram os efeitos da instabilidade na resistência última de perfis de aço em sistemas de vigas mistas contínuas casteladas. O comportamento complexo destas vigas está associado a diferentes efeitos de instabilidade a que a viga mista castelada pode estar sujeita em regiões de momento negativo onde a mesa de compressão inferior da viga é irrestrita. Investigações numéricas realizadas para o comportamento distorcional fora do plano provam que a instabilidade da alma é o modo de falha dominante que é mais pronunciado para vigas mais curtas e todas as seções de aço celular analisadas. O modo de flambagem RDB (ruptura por distorção contida) é torcional-distorcional para vãos de vigas mais curtos, enquanto para vãos maiores o modo de flambagem muda para lateral-distorcional.

A comparação entre vigas de alma simples e mistas celulares mostra que a teoria do mecanismo de dobradiça plástica da viga para comportamento no plano com contribuição da força de cisalhamento incluída apenas no perfil de aço leva a seções I mais leves e valores mais baixos do que aqueles correspondentes ao RDB final carregar.

Zuhairi e Mansi (2017) estudando o comportamento de vigas mistas alveolares de aço-concreto à flexão. Foi utilizado o Método dos Elementos Finitos e o *software* ANSYS para a análise numérica do problema. Elementos tridimensionais do tipo *brick* foram usados para a modelagem do concreto e do tipo *shell* para a viga alveolar de aço. Foi feito um estudo paramétrico focando na variação da razão dos alvéolos, variando entre 25%, 35% e 45%. Os resultados mostram uma redução na deformação máxima no meio do vão das vigas mistas alveolares com o aumento da razão dos alvéolos, como mostra a Figura 2.22. A capacidade de momento da viga mista foi aumentada com o aumento da razão dos alvéolos na deformação máxima permissível no meio do vão. Esse aumento foi de 18,4%, 51,5% e 93,8% para as taxas de 25%, 35% e 45%, respectivamente.

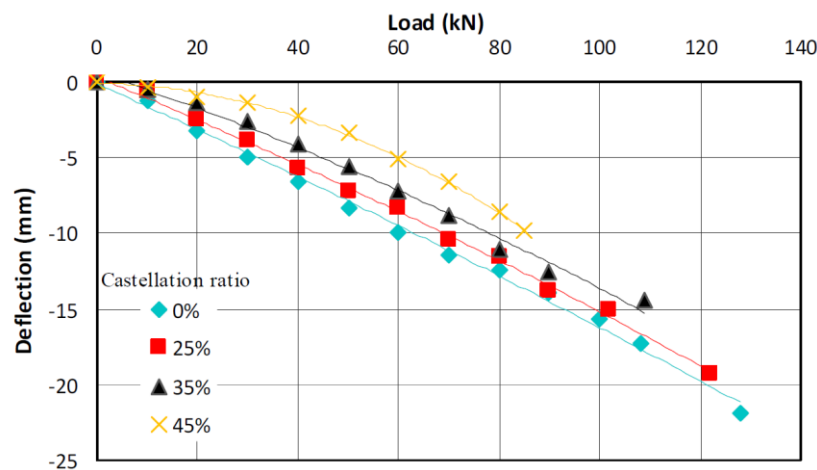


Figura 2.22 - Deformação por carga no meio do vão para vigas compostas com várias razões dos alvéolos (ZUHAIRI; MANSI, 2017).

Benincá e Morsch (2020) realizaram um estudo sobre a simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço-concreto, focando na flambagem da alma, no efeito Vierendeel e nos mecanismos de flexão utilizando o *software* ANSYS, Figura 2.23. Os autores concluíram que os ganhos estruturais devido à expansão do perfil de aço tornam-se mais evidentes em vãos maiores, e que os ganhos de capacidade de carga podem ser limitados quando o feixe alveolar da viga falha por flambagem da alma, necessitando garantir uma grande resistência a esse tipo de falha

(Figura 2.24). Por outro lado, quando o modo de falha é a formação de um mecanismo de flexão, o ganho de capacidade de carga é influenciado pelo tamanho do alvéolo e pela altura da seção.

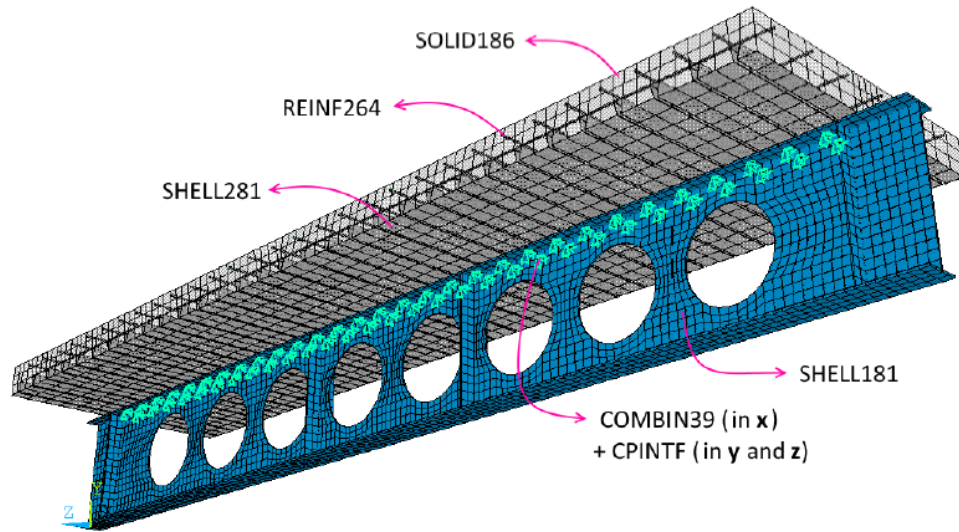


Figura 2.23 - Elementos finitos utilizados no desenvolvimento do modelo numérico (BENINCÁ; MORSCH, 2020).

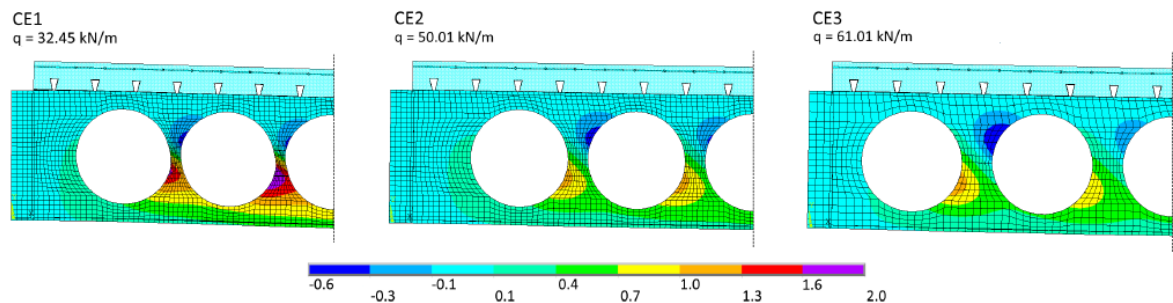


Figura 2.24 - Flambagem da alma nas vigas CE1, CE2 e CE3, com deslocamentos transversais em cm (BENINCÁ; MORSCH, 2020).

## 2.6 VIGA ALVEOLAR PROTENDIDA

Pode ser feita a adição de cabos protendidos em vigas alveolares de aço, no entanto, não foram encontrados estudos sobre o assunto, foram encontrados estudos com vigas alveolares protendidas mistas, não apenas de aço, como mostra o subcapítulo 2.8.

O único trabalho encontrado que se assemelha ao assunto é o de Kopálová e Pripramsky (2018) que estudou o comportamento da viga I UHPC (concreto de ultra alto desempenho) protendida com alma fina que é carregada segundo o teste de flexão de quatro pontos. A aplicação de cabos

protendidos garante resistência suficiente para a ação de flexão; os membros são projetados de forma que a falha ocorra por resposta ao cisalhamento.

A partir dos resultados da análise numérica, a viabilidade da viga em I de concreto com alma leve de UHPC (Figura 2.25) é aparente e será posteriormente verificada em amostras reais, que ainda serão realizadas segundo os autores (KOPÁLOVÁ; PRIBRAMSKY, 2018). A análise mostra um grande potencial para clarear as paredes da viga UHPC e adicionar teias com tendões de protensão.

Os resultados obtidos serão avaliados e comparados com a análise numérica no Atena 2D. Em função do comportamento das vigas com a alma leve, o dimensionamento do painel de parede pré-fabricado é planejado em maior escala, que será protendido com tendões no sentido da diagonal de tração. O valor total da carga no ponto em que a diagonal de tração é significativamente quebrada é 94,92 kN ( $2 \times 47,46$  kN). Isso é três vezes e meia a carga entre as fissuras do corpo de prova com a alma não protendida. É óbvio que a magnitude do protensão pode ser aumentada neste modelo, portanto o potencial da alma protendida é significativo.

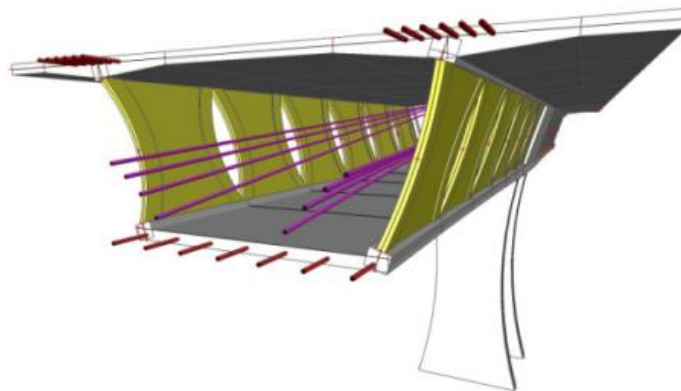


Figura 2.25 - Visualização da ponte com painéis da alma UHPC pré-fabricados (KOPÁLOVÁ; PRIBRAMSKY, 2018).

## 2.7 VIGA MISTA PROTENDIDA

Diferentemente das vigas alveolares protendidas, as vigas mistas protendidas apresentam mais estudos científicos, de acordo com pesquisa sobre o assunto em banco de dados, mais trabalhos foram encontrados acerca de vigas mista protendidas.

Ayyub, Sohn e Saadatmanesh (1990), realizaram análises em vigas mistas protendidas sob momento positivo. Os resultados do teste mostram que a protensão de uma viga mista aumenta a faixa de comportamento elástico, reduz as deflexões, aumenta a resistência máxima e aumenta a redundância ao fornecer vários caminhos de tensão. Com base nos resultados experimentais, foi feita uma comparação entre três tipos e perfis de tendões. Concluiu-se que os cordões são mais eficazes do que as barras para o tipo de cabo, e um perfil de cabo reto é mais eficaz do que um perfil drapeado no que diz respeito à rigidez.

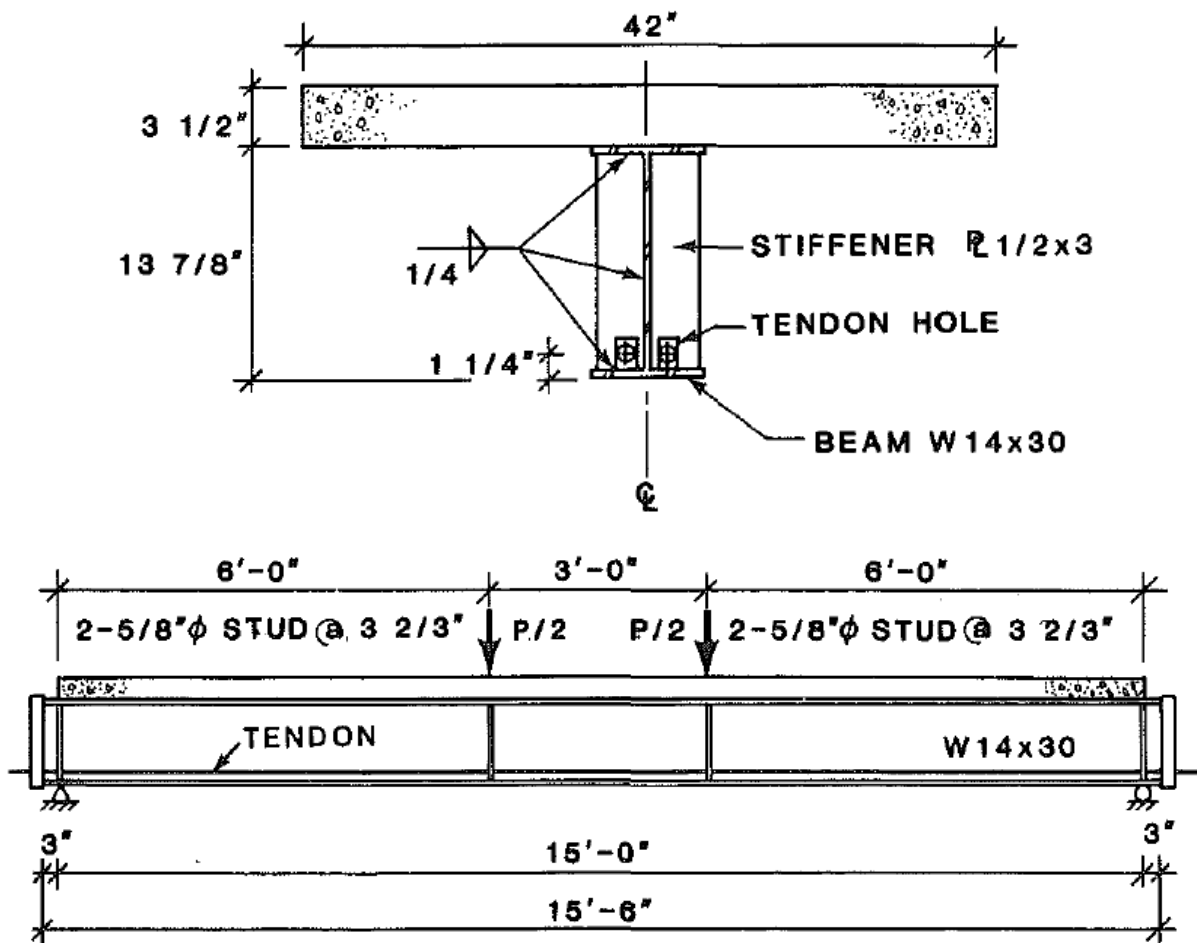


Figura 2.26 - Detalhes da viga experimental (AYYUB; SOHN; SAADATMANESH, 1990).

Lorenc e Kubica (2006) fizeram um estudo experimental sobre os mecanismos de ruptura e o comportamento de vigas mistas aço-concreto protendidas com cabos externos e submetidas à flexão positiva (Figura 2.27). Com base nos dados experimentais, as seguintes conclusões foram tiradas: a protensão resultou em um aumento da carga final e a capacidade de carga aumentou em 25% em comparação com a viga não protendida; para uma mesma excentricidade

dos cabos, não há diferença significativa entre o comportamento de vigas protendidas com cabos drapeados e com cabos retos sem pontos intermediários.

O mecanismo de ruptura consistiu no escoamento da parte inferior da seção de aço sob tensões de tração, seguido do esmagamento da laje de concreto por compressão. O aço da mesa inferior determinou a capacidade de carga da viga. A placa de cobertura, a mesa inferior e quase toda a alma da seção de aço cedeu sob tensão. A laje de concreto tinha uma reserva de capacidade significativa, pois foi esmagada sob uma grande deformação (acima de 3‰) induzida por uma grande curvatura. Os tendões não se romperam em nenhum dos casos. Após o esmagamento da laje, as vigas empenaram-se devido a forças significativas nos tendões.

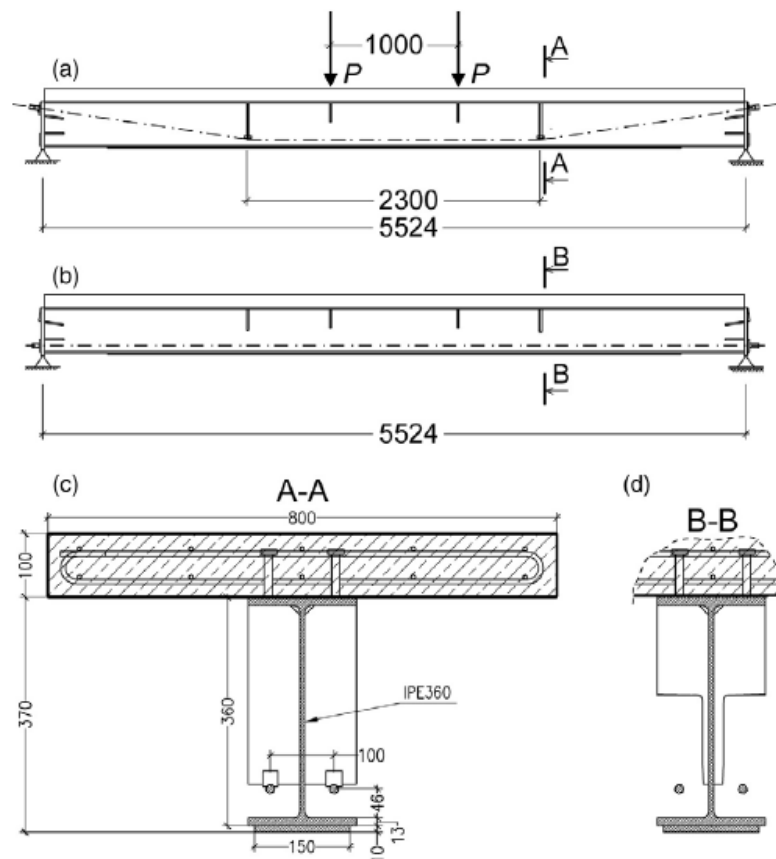


Figura 2.27 - Geometria das vigas: vista lateral da viga protendida com cabos drapejados (a) e cabos retos (b) e seção transversal da viga protendida com cabos drapejados (c) e cabos retos (d) (LORENC; KUBICA, 2006).

Em um trabalho elaborado por Sun et al. (2014), foram realizados ensaios de laboratório em cinco vigas mistas protendidas e não protendidas. Com base na comparação dos resultados obtidos, verificou-se que a rigidez de uma viga mista simplesmente apoiada sob momentos fletores pode ser efetivamente melhorada pela protensão. Em comparação com a viga mista não



protendida de referência, a flecha da viga de prova protendida reduziu em 26% no estágio elástico.

Uy e Craine (2004) realizaram um estudo experimental e numérico em vigas mistas de aço e concreto com e sem protensão, e concluíram que embora as dimensões da laje de concreto e a resistência do concreto tenham efeito sobre o comportamento, é a força inicial no cabo e a excentricidade do cabo que afetam significativamente a resistência e a rigidez desses membros.

O pós-tensionamento mostrou causar um aumento na resistência de cerca de 20%, sem grande redução na ductilidade observada. Aumentos moderados de 15-20% na resistência podem ser alcançados com uma aplicação muito pequena de força de protensão sem um grande comprometimento da ductilidade. O efeito de aumentar a excentricidade é criar um aumento tanto na rigidez quanto na resistência da viga, conforme mostrado na Figura 2.28.

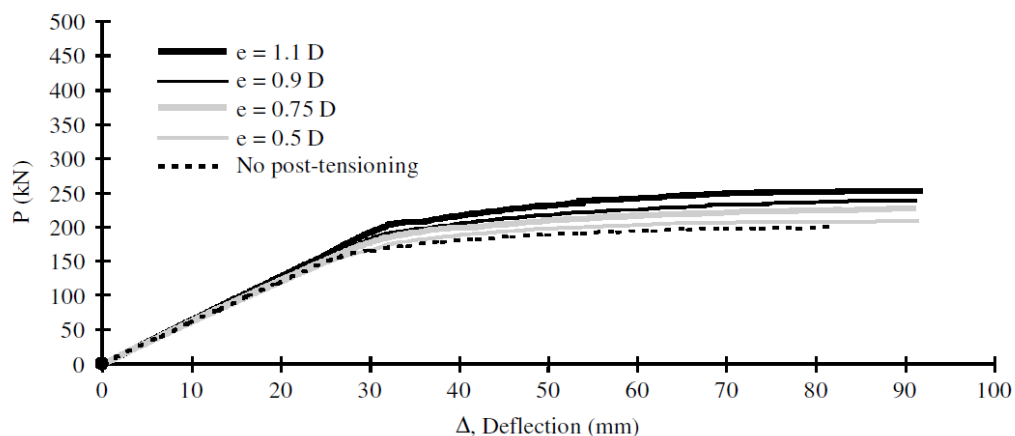


Figura 2.28 - Efeito da excentricidade do cabo protendido (UY; CRAINE, 2004).

Nie et al. (2007) investigaram o comportamento de vigas mistas aço-concreto protendidas simplesmente apoiadas por meio de estudos experimentais e analíticos. E observaram que a força de protensão aumenta significativamente o momento de escoamento, o momento último e a rigidez elástica das vigas mistas protendidas.

A dissertação de Silva (2018) investigou, por meio de modelagem numérica com o Método dos Elementos Finitos (MEF), o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com aplicação de protensão (Figura 2.29). As simulações foram desenvolvidas utilizando o software ABAQUS, contemplando duas tipologias principais: vigas mistas convencionais e vigas mistas parcialmente revestidas de concreto.

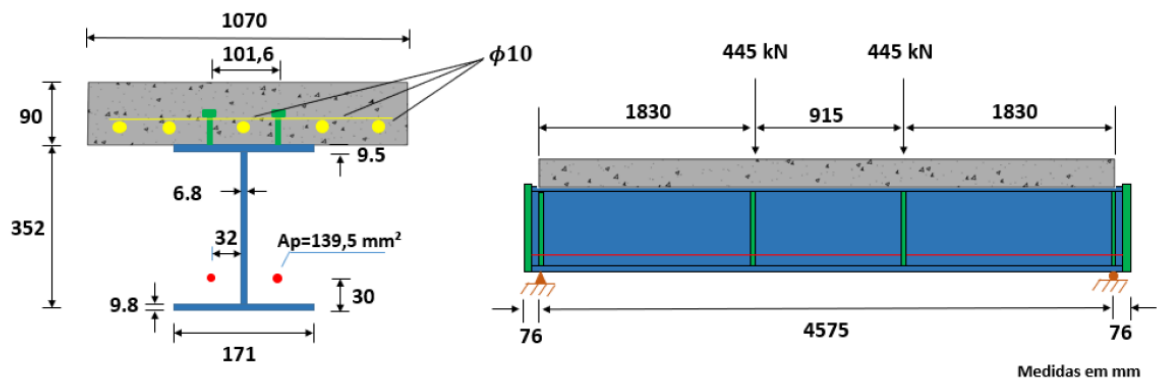


Figura 2.29 - Detalhes da viga VMP1 (SILVA, 2018).

A metodologia proposta demonstrou elevada capacidade de representação do comportamento físico dessas estruturas, com boa correlação entre os resultados numéricos e os dados experimentais da literatura. No caso das vigas mistas convencionais, verificou-se que a modelagem da interface aço-concreto com conectores de cisalhamento representados por interações de contato apresentou resultados mais compatíveis com os ensaios experimentais, quando comparada à vinculação idealizada por acoplamento perfeito (TIE). Os modelos calibrados reproduziram com precisão a rigidez inicial, o pico de carga e o modo de colapso das estruturas, com desvios médios inferiores a 10% no momento último.

Os resultados indicaram que a aplicação da força de protensão promoveu acréscimos significativos no desempenho estrutural. Para as vigas convencionais, a elevação da força de protensão de 43 kN para 173 kN resultou em um aumento do momento fletor resistente de aproximadamente 26%, além da redução de flechas máximas em cerca de 20%, evidenciando maior rigidez e capacidade portante. Observou-se também que o traçado do cabo influencia diretamente os resultados: cabos com traçado poligonal apresentaram comportamento estrutural superior em relação aos traçados retilíneos, tanto em termos de capacidade resistente quanto em controle de deformações.

Nas vigas mistas parcialmente revestidas, observou-se que a introdução da protensão também contribuiu de forma significativa para o aumento da capacidade resistente e para a redução de deslocamentos. Comparando os modelos com e sem protensão, foi verificado um incremento de até 19% na força última e uma redução de até 15% nas deformações máximas. Além disso, a distribuição de tensões indicou melhor aproveitamento do concreto comprimido e menor solicitação nas mesas do perfil metálico.

Por fim, o estudo paramétrico conduzido por Silva (2018) demonstrou que a excentricidade do cabo de protensão influencia diretamente o desempenho estrutural das vigas. Modelos com maior excentricidade (502 mm) apresentaram momentos últimos até 30% superiores em relação àqueles com excentricidades menores (382 mm), destacando a importância da otimização geométrica no projeto de sistemas protendidos.

Nelsen e Souza (2012) realizaram um estudo analítico sobre vigas mistas de aço e concreto com protensão externa, e verificou-se que o uso da protensão proporciona uma redução das tensões máximas de solicitação da viga, conseqüentemente, possibilita uma redução da seção transversal do perfil de aço, desde que respeitadas algumas restrições de projeto.

Maiores excentricidades resultam em maior capacidade resistente para a viga de aço, independente da forma de aplicação da protensão (NELSEN, 2013).

Xu e Sun (2018) realizaram um estudo numérico utilizando o *software* ABAQUS, modelos de plasticidade foram usados para simular vergalhões e perfis de aço tipo H, que atenderam ao critério de escoamento de von Mises e simular as propriedades elastoplásticas dos materiais metálicos. A simulação numérica das vigas metálicas protendidas reforçadas com concreto (PSRCB) tem as seguintes características: menor capacidade de carga máxima em  $P_u$ , maiores valores de rigidez da simulação da curva carga-deslocamento antes do  $P_u$  e diminuição mais rápida da rigidez após o  $P_u$ . Os resultados numéricos concordaram bem com os resultados dos testes e o modelo numérico pode simular o desempenho mecânico do PSRCB.

Wang, Zhu e Shen (2013) elaboraram uma análise numérica em vigas de aço reforçadas com concreto e protendidas utilizando o *software* ABAQUS, utilizando o método *cooling* para simular a força de protensão e o método *embedded region* para simular o contato entre o concreto e o aço. O concreto foi modelado com o elemento C3D8R, o aço da armadura e dos cabos de protensão com o elemento T3D2 e a viga H de aço com o elemento S4R.

O modelo foi elaborado em duas etapas, a primeira etapa contou apenas a resposta da viga sob a força efetiva protendida e seu próprio peso. A segunda etapa pode aplicar gradualmente o deslocamento no meio da viga. Almofadas de aço foram aplicadas na viga para evitar a concentração de tensões na parte inferior da viga durante o processo de carregamento. O algoritmo geral estático foi utilizado para considerar os efeitos não lineares geométricos.

Os autores concluíram que, quanto maior a força efetiva protendida, maior o valor da flecha do arco invertido e da carga de fissuração. Com o aumento da força protendida, a deformação correspondente à carga última diminuiu. Além disso, a rigidez das curvas de carga-deslocamento tornou-se maior e sua linearidade tornou-se mais longa com o aumento da força efetiva protendida. Assim, para o mesmo deslocamento, a força protendida efetiva pode melhorar a capacidade de carga da viga para uma determinada faixa. Isso pode ser explicado pelo método de carga equivalente. A força protendida é contrária à carga de uso adicionada à seção da viga antes da carga de suporte. A força efetiva protendida aumenta, a carga reversa também aumenta, assim a capacidade de carga da viga também aumenta.

Tamayo et al. (2019) fizeram uma pesquisa sobre alguns dos principais aspectos da modelagem numérica 3D de vigas mistas aço-concreto com cabos protendidos internos e externos utilizando o *software* ANSYS, levando em conta a não linearidades dos materiais envolvidos em decorrência das cargas aplicadas de curto e longo prazo. No caso de cabos internos não aderidos, a consideração da rigidez do cabo visa acelerar a relação de convergência do processo não linear e assegurá-la.

Na modelagem, a omissão do escorregamento na interface do cabo e do desviador pode levar a resultados imprecisos no cálculo da força do cabo ao prever diferentes valores de tensão entre os dispositivos do desviador. Quando os elementos de contato são introduzidos, uma força uniforme do cabo é obtida, o que está de acordo com a evidência experimental. No entanto, parece que a resposta geral da estrutura expressa em termos de curvas carga-deslocamento permanece inalterada pela inclusão de deslizamento na interface cabo-desviador.

Ribeiro et al. (2021) fizeram um estudo do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa utilizando a técnica de pré-tensionamento com cabos retos. Embora a protensão tenha gerado uma melhora considerável no comportamento das vigas mistas à flexão, reduzindo o momento fletor de projeto e aumentando o momento fletor último, sua melhora na taxa de aproveitamento da viga foi menos perceptível, pois a força de compressão no perfil de aço devido à força de protensão introduz tensões de compressão que se somam às tensões decorrentes da flexão.

Concluiu-se também que a utilização de perfis mono simétricos em vigas mistas só é interessante do ponto de vista econômico para vigas sem protensão e com índice de mono simetria menor que 2,83.

$$\alpha_m = \frac{I_{yt}}{I_{yc}} \quad 1 \leq \alpha_m \leq 9 \quad (2.5)$$

Onde:  $I_{yc}$  é o momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo que atravessa a alma a meia espessura;  $I_{yt}$  é o momento de inércia do banzo tracionado em relação ao eixo que atravessa a alma a meia espessura; o grau de mono simetria,  $\alpha_m$ , que pode variar de 1 (para seções duplamente simétricas) até um valor máximo de 9.

Por fim, observa-se que a protensão tem influência significativa no controle de deslocamento excessivo ao analisar reduções na flecha no meio do vão de vigas mistas protendidas em relação a vigas mistas não tensionadas. A análise dos resultados permitiu observar os benefícios da aplicação de protensão externa em vigas mistas para o controle de Estado de Limite Último (ELU) e Estado de Limite de Serviço (ELS), pois houve aumento tanto na resistência quanto na rigidez das vigas.

## 2.8 VIGA MISTA ALVEOLAR PROTENDIDA

Sobre Vigas Mistas Alveolares Protendidas, o tema específico do trabalho, foram encontrados poucos estudos, sendo estes citados a seguir.

Os pesquisadores Afefy, Atta e Raher (2012) realizaram um estudo experimental em dez vigas mistas alveolares protendidas reforçadas. As vigas foram separadas em três grupos, o primeiro com quatro espécimes de vigas mistas alveolares com diferentes cargas de protensão e sem qualquer configuração de reforço, sendo esse o grupo de referência. O segundo com teve três espécimes com a mesma configuração de protensão, mas com reforços verticais. O terceiro grupo com três vigas cobertas por concreto e sem reforço. As três cargas de protensão foram 25% e 50% da deformação de escoamento da barra de aço e 50% da deformação de escoamento da barra de aço após o preenchimento dos dois primeiros alvéolos.

O experimental os dados mostraram a influência desfavorável da pretensão externa no comportamento global da viga. Por outro lado, o encapsulamento parcial da alma da seção de aço apresentou aumento significativo na capacidade final e decréscimo da flecha vertical do feixe. Além disso, o efeito de pré-tensionamento manifesta seu efeito afirmativo para a seção de concreto em comparação com o de aço.

Para o grupo de referência, a capacidade de carga final é inversamente proporcional à razão de pretensão, uma vez que aumentar a taxa de pretensão de 25 para 50% leva à diminuição da capacidade de carga final. Isso pode ser atribuído ao desenvolvimento de tensão combinada devido à força compressiva resultante da pretensão e força de cisalhamento vertical na zona final, que desencadeia a flambagem lateral da coluna. Na Figura 2.30 é possível visualizar as falhas de algumas vigas selecionadas.



Figura 2.30 - Modos de falha de espécimes selecionadas. (a) Deformação da viga de referência sem pretensão e sem enrijecedores (b) Falha de *end zone* de espécime BIP50 (c) Falha da amostra BIP50p (d) Empenamento dos enrijecedores verticais da amostra BIIP25 (e) Falha da amostra BIIP50p (f) Falha de compressão da amostra BIIP25 (AFEFY; ATTA; TAHER, 2012).

Oukaili e Abdullah (2017) realizaram uma avaliação experimental do comportamento de nove vigas mistas de concreto-aço alveolar sob efeito combinado de flexão e torção foi examinada até a ruptura, onde duas técnicas de reforço foram implementadas: reforço por enrijecimento intermediário apenas ou com ambos pretensão externa e enrijecedores intermediários.

Os resultados experimentais mostram que a adição de enrijecedores intermediários apenas melhorou a capacidade de carga em 21,8% para corpos de prova sob momento fletor puro, 33,3% para corpos de prova sob efeito combinado de flexão e torção e 4,44% para corpos de prova sob torção pura, respectivamente, como mostra a Figura 2.31. A outra técnica de reforço aumentou a capacidade de carga em 134,3%, 116,6% e 4,88%, respectivamente. Vale ressaltar que, a primeira técnica reduziu a flecha de meio vão sob cargas de serviço em 22% e 13% para corpos de prova sob flexão pura e flexão e torção combinadas, respectivamente. Enquanto a segunda técnica diminuiu, os valores mencionados foram de 61% e 44%, respectivamente.

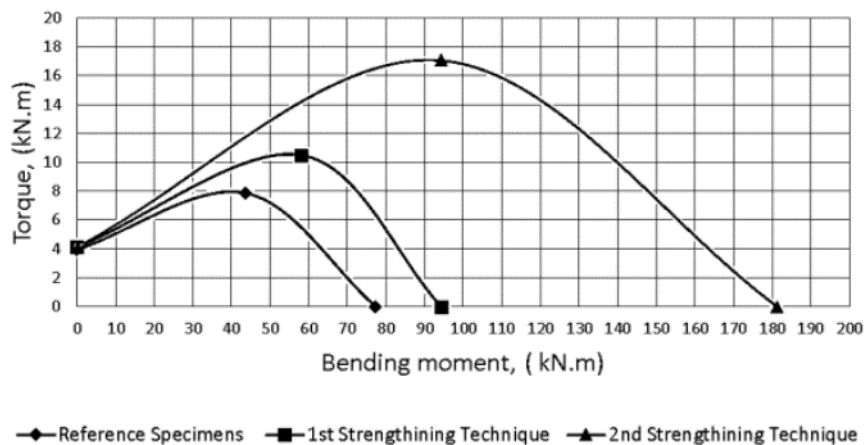


Figura 2.31 - Diagrama de interação da flexão-torção (OUKAILI; ABDULLAH, 2017).

Em outro estudo, Oukaili e Abdullah (2018) estudaram o desempenho de vigas mistas de aço-concreto expandido com alma aberta sob flexão e torção combinadas foi investigado até a ruptura. Duas técnicas de reforço foram propostas: a primeira, pela adição de reforços de aço apenas às seções de alma, e a segunda pela exposição de vigas mistas a protensão externa após o apoio das seções de alma com reforços de aço. Seis espécimes foram testados divididos entre os dois grupos principais. Cada grupo incluiu três corpos-de-prova, que foram designados de acordo com o tipo de técnica de reforço utilizada. Capacidade de carga, respostas de carga-deformação e deformação na altura da seção foram monitoradas. Na Figura 2.32 podemos observar os tipos de rupturas.

Os resultados mostraram que a primeira técnica de reforço reduziu a deformação sob cargas de serviço em 14,13% e 11,55% para amostras acasteladas e celulares, respectivamente, enquanto a segunda técnica diminuiu os valores comparativos em 147,82% e 30,11%, respectivamente (Figura 2.33). Em termos do ângulo de torção, a rigidez torcional aumentou 27,58% devido à aplicação de reforços de aço para corpos de prova acastelados, enquanto, nos corpos de prova celulares, não houve contribuição aparente da adição desses reforços em termos de melhorar o desempenho de torção no início estágios de carregamento. A segunda técnica mostrou uma redução maior no ângulo de torção, de 93,10% e 39,53% para espécimes acastelados e celulares, respectivamente.





Figura 2.32 - Modos de ruptura dos ensaios experimentais (OUKAILI; ABDULLAH, 2018).

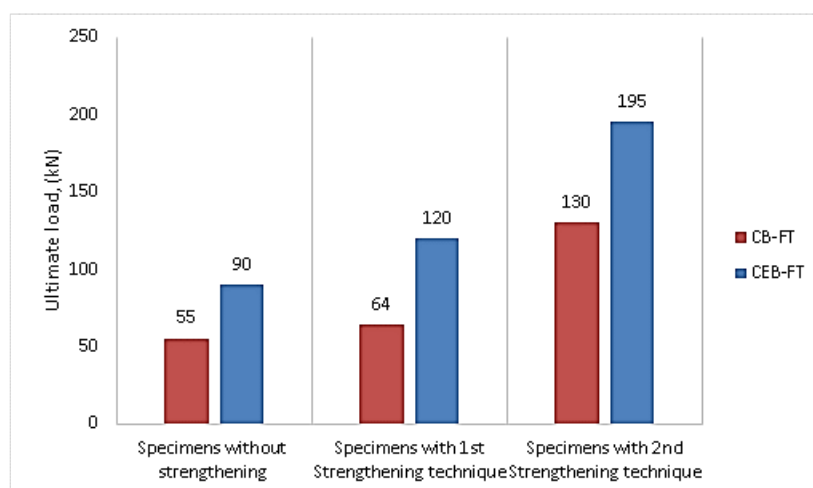


Figura 2.33 - Comparação da carga resistente dos ensaios experimentais (OUKAILI; ABDULLAH, 2018).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO TEMA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Vigas mistas alveolares protendidas são compostas por sete componentes básicos: a laje de concreto armado, o perfil de aço alveolar, a solda que une os perfis de aço cortados, os conectores de cisalhamento, os cabos de protensão, os desviadores utilizados para executar o traçado do cabo e a ancoragem dos cabos.

A seguir, será estudado cada um desses itens, focando nas propriedades dos materiais, as quais serão baseadas nas normas da ABNT, que serão citadas no decorrer deste capítulo.

#### 3.2 LAJE DE CONCRETO ARMADO

Vigas mistas de aço-concreto são formadas por lajes de concreto armado que se apoiam em perfis de aço (Figura 3.1). Apenas uma parte da laje de concreto armado é considerada para contribuir com a resistência da viga mista, considerada como a parte efetiva da laje. Nessa composição, a laje absorve grande parte do esforço de compressão decorrente do momento fletor atuante.

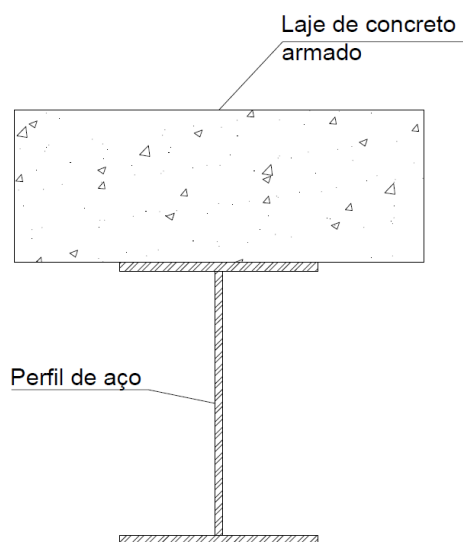


Figura 3.1 - Viga mista de aço-concreto.

O concreto é um material que possui elevada resistência a compressão e baixa resistência a tração, logo, atuando como laje em uma viga mista, a peça atua de maneira muito eficiente no aumento da capacidade resistente da estrutura.

### 3.2.1 Propriedade mecânicas

Para vigas mistas, a norma NBR 8800 (ABNT, 2008) afirma no item 4.5.3.1 que as propriedades do concreto devem obedecer a NBR 6118 (ABNT, 2014). A norma também especifica que a resistência característica à compressão desse tipo de concreto,  $f_{ck}$ , deve situar-se entre 20 MPa e 50MPa.

Nesse trabalho será utilizado o concreto com  $f_{ck}$  de 35 MPa, logo, os valores adotados estão discriminados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades do concreto armado com $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ .	
Propriedade	Valor
Peso específico ( $\gamma_{gc}$ )	25,00 $kN/m^3$
Coeficiente de dilatação térmica ( $\beta_c$ )	$10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coeficiente de Poisson ( $\nu_c$ )	0,20
Densidade ( $\rho_c$ )	2,75E – 09 $ton/mm$
Módulo de Young ( $E_{ci}$ )	33.130 $MPa$

O modulo de elasticidade ou módulo de Young ( $E_{ci}$ ), de acordo com o item 8.2.8 da NBR 6118 (ABNT, 2014), considera o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade. Mas em caso em que não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor com base na equação (3.1).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (3.1)$$

Onde  $\alpha_E$  é o parâmetro em função da natureza do agregado, sendo considerado o agregado graúdo granito, logo,  $\alpha_E = 1,0$ .

### 3.3 PERFIL DE AÇO

Perfis de aço estrutural são altamente utilizados por terem boa ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, além de elevada relação entre tensão resistente e a de escoamento.

O aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11% (PFEIL; PFEIL, 2009), logo, para atender os requisitos necessários, utilizam-se em estruturas os aços-carbono e os aços em baixo teor de liga ou micro ligados, ambos os tipos com baixo e médio teores de carbono. A elevada resistência de alguns aços estruturais é obtida por processos de conformação ou tratamentos térmicos.

Outra vantagem da utilização de perfis de aço estrutural é a possibilidade de obter perfis de geometrias diversas, como perfis em “T”, “I”, “U”, “L”, entre outros. No trabalho serão utilizados os perfis “I”, os quais podem ser produzidos por laminação ou por solda de placas metálicas.

Os perfis de aço que serão utilizados nesse estudo são perfis soldados, os quais possibilitam geometrias além das bitolas dispostas pelos fabricantes de perfis laminados. Esse tipo de perfil permite vigas esbeltas, ou seja, que possuem grande altura de alma. Para combater flambagens locais quando ocorrem altas tensões de cisalhamento, são usados enrijecedores.

#### 3.3.1 Propriedades mecânicas

O aço tem como uma de suas principais características a sua ductilidade – capacidade de um material sofrer deformação permanente (plástica) quando submetido a um esforço de tração. A ductilidade é formada por resiliência (energia absorvida no regime elástico) e tenacidade (energia absorvida em uma sollicitação que leve o material à fratura, ou seja, considera o regime elástico e plástico). No diagrama tensão-deformação genérico do aço (Figura 3.2) pode-se ver os regimes do material.

No entanto, o aço ASTM A-36 utilizado na pesquisa tem o diagrama tensão-deformação específico ilustrado na Figura 3.3.

Outro fator que deve ser levado em conta na utilização de peças de aço, é a resistência a fadiga, pois pode provocar uma ruptura abrupta da estrutura. Mesmo estando dimensionada para

esforços estáticos, estruturas mistas estão sob ações de cargas dinâmicas a todo momento (ação do vento, sismos, utilização da edificação, entre outros).

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), a resistência a fadiga é fortemente diminuída nos pontos de concentração de tensões, logo, precisa ter cuidado nos cantos retangulares dos alvéolos que ocorrem no estudo.

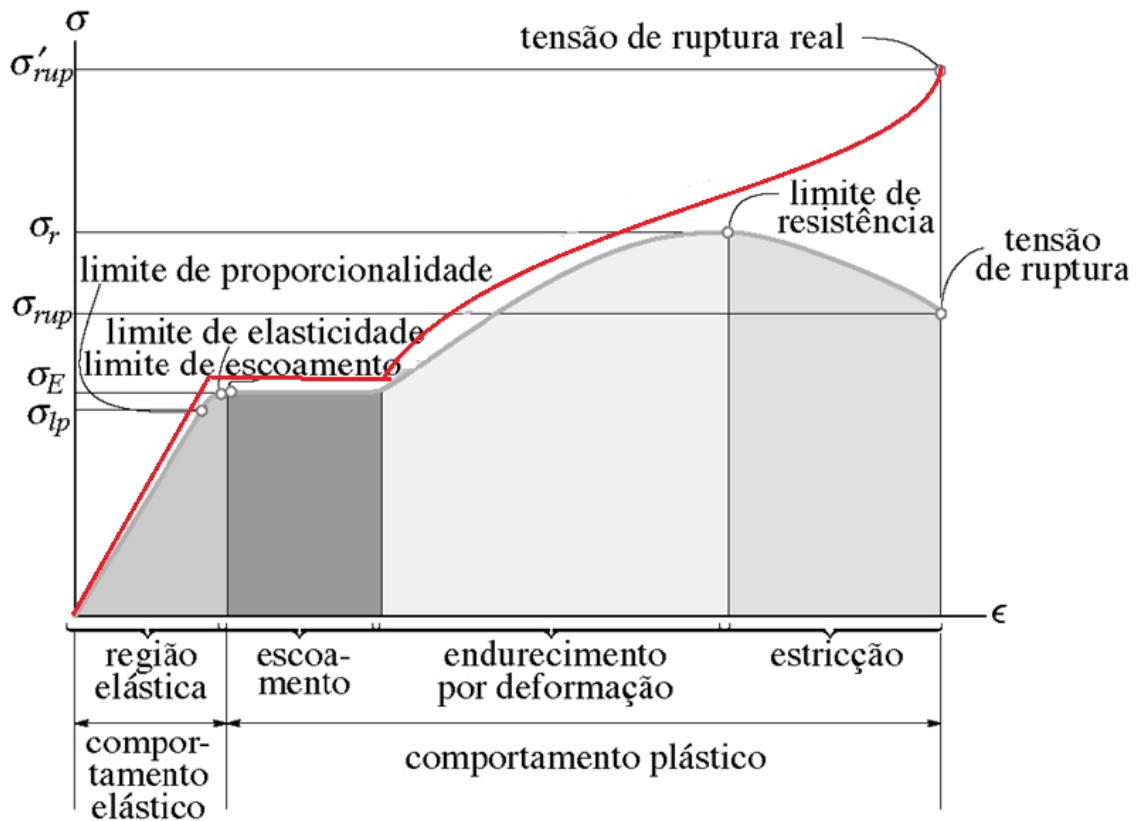


Figura 3.2 - Diagrama tensão-deformação genérico para aço sem escala (Adaptado de HIBBELER, 2000).

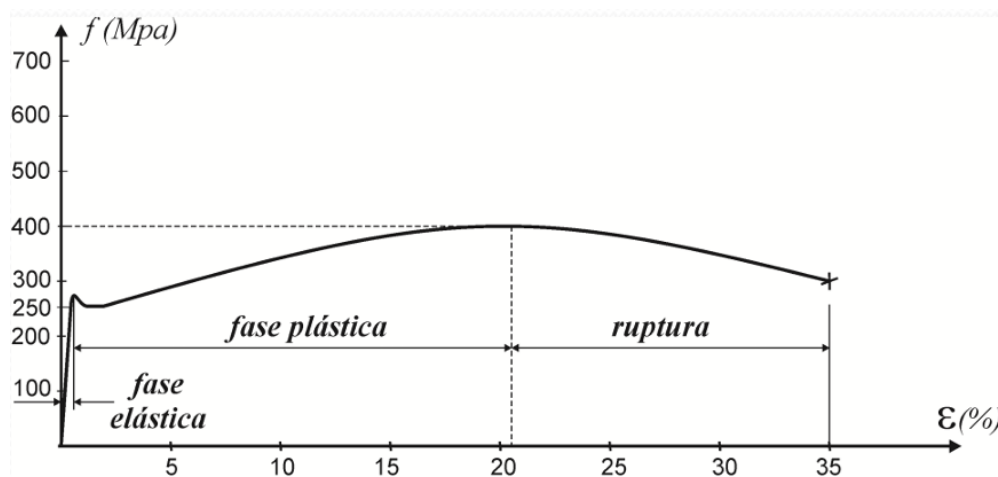


Figura 3.3 - Diagrama tensão-deslocamento do aço ASTM A-36.

O aço utilizado nessa pesquisa foi o tipo ASTM A-36, e possui as seguintes características físicas da Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades do aço A-36.

Propriedade	Valor
Peso específico ( $\gamma_{gs}$ )	$77,00 \text{ kN/m}^3$
Coefficiente de dilatação térmica ( $\beta_y$ )	$1,16 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coefficiente de Poisson ( $\nu_y$ )	0,26
Densidade ( $\rho_y$ )	$8,65 \text{E} - 09 \text{ ton/mm}$
Módulo de Young ( $E_{st}$ )	$200.000 \text{ MPa}$
Limite de escoamento ( $f_{yk}$ )	$250 \text{ MPa}$
Limite de ruptura ( $f_u$ )	$400 \text{ MPa}$

### 3.4 SOLDA

Segundo Pfeil e Pfeil (2009), solda é um tipo de união por coalescência do material, obtida por fusão das partes adjacentes. Neste estudo, a solda será utilizada para na conexão dos componentes do perfil de aço formando a viga alveolar (Figura 3.4), logo, a conexão precisa garantir a resistência da peça estrutural e a transferência de esforços.

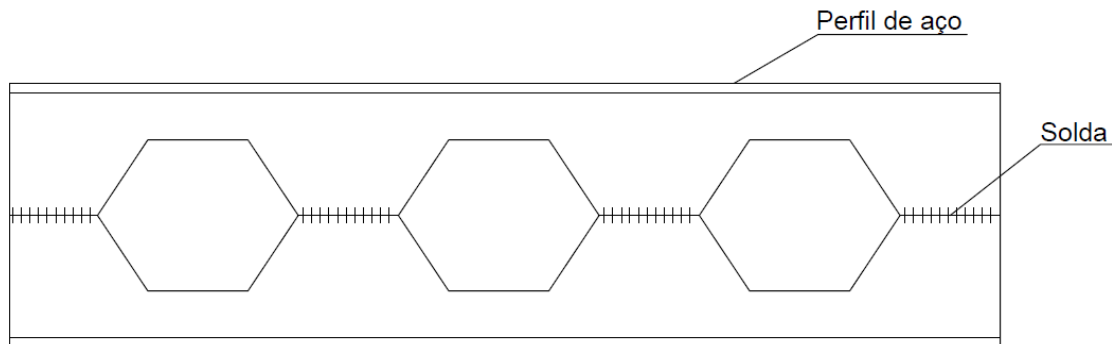


Figura 3.4 - Viga alveolar soldada.

Dentre os diversos tipos de soldas disponíveis, será utilizada a solda de entalhe com penetração total, como ilustra a Figura 3.5. Com base no item 6.2.2.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008), a área efetiva ( $A_w$ ) da solda deve ser calculada como o produto do comprimento efetivo da solda pela espessura da garganta efetiva, onde o comprimento efetivo da solda é igual ao seu comprimento real (igual à largura da parte ligada) e a espessura da garganta efetiva da solda é igual à menor das espessuras das partes soldadas. Nos casos executados nesse trabalho, a espessura da alma dos perfis será a espessura das soldas.

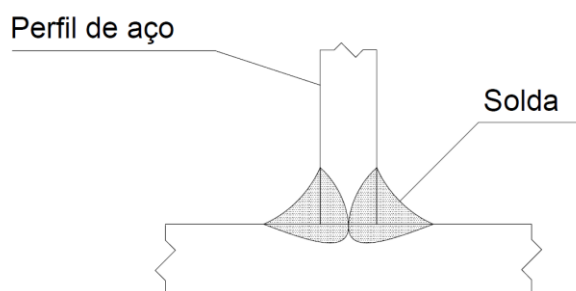


Figura 3.5 - Solda de entalhe com penetração total.

#### 3.4.1 Propriedades mecânicas

Em soldas de entalhe com penetração total, a resistência da conexão é a resistência mínima à tração do metal base da solda, que neste estudo será utilizado o eletrodo E60, o qual apresenta a resistência mínima à tração de 60ksi, ou seja, um limite de ruptura ( $f_w$ ) de 415MPa.

No item 6.2.5.1 da NBR 8800 (ABNT, 2008), especifica que a força resistente de cálculo ( $F_{w,Rd}$ ) para diversas situações.

- Tração ou compressão paralelas ao eixo da solda: Não precisa ser considerado;
- Tração ou compressão normal à seção efetiva da solda: Metal-base:  $A_{MB}f_y/\gamma_{a1}$

- Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva: Metal-base:  $0,60A_{MB}f_y/\gamma_{a1}$

Onde:  $A_{MB}$  é a área do metal-base;  $f_y$  é a menor resistência ao escoamento entre os metais-base da junta; e  $\gamma_{a1}$  é igual a 1,25 para combinações normais, especiais ou de construção e igual a 1,05 para combinações excepcionais.

### 3.5 CONECTORES DE CISALHAMENTO

Conectores de cisalhamento são dispositivos mecânicos destinados a garantir o trabalho conjunto da seção de aço com a laje de concreto, configurando o comportamento de uma viga mista. Segundo Pfeil e Pfeil (2009), o conector absorve os esforços cisalhantes horizontais que se desenvolvem na direção longitudinal na interface da laje com a mesa superior da seção de aço e ainda impede a separação física desses componentes.

O *stud-bolt* (Figura 3.6), também conhecido como pino de cabeça, é um dos tipos de conectores mais utilizados.

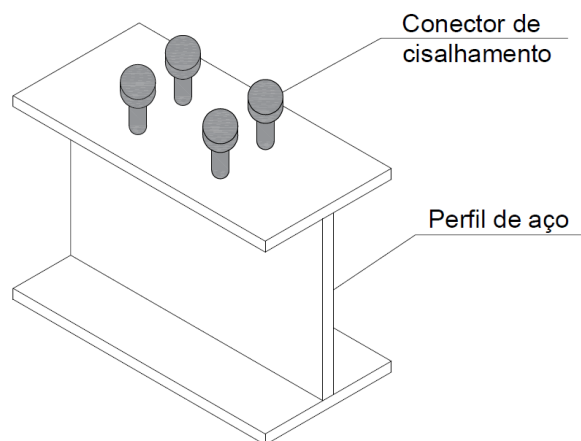


Figura 3.6 - Conector de cisalhamento *stud bolt*.

As principais vantagens do conector *stud-bolt* são: alta velocidade de soldagem; boa ancoragem no concreto; facilidade de disposição da armadura da laje e facilidade de produção em grande escala (MAHDI et al., 2012).

Segundo Alves (2018), os conectores podem garantir a interação total entre os materiais (os materiais chegam à ruptura antes do escoamento dos conectores) ou a interação parcial entre os



elementos da estrutura mista (os conectores sofrem plastificação e escorregamento na interface antes do rompimento dos demais materiais).

Os conectores podem ser classificados de duas formas: como rígidos, onde são caracterizados por baixas deformações e pouco deslizamento entre a viga de aço e a laje de concreto armado, apresentando características e colapso frágil; ou como flexíveis, tendo deformações em situações de serviço.

Para os conectores do tipo pino com cabeça deve ser considerado seu comprimento após a instalação no mínimo igual a 4 vezes o diâmetro. E, todos os conectores de cisalhamento devem ficar completamente imersos no concreto das lajes, com cobrimento superior mínimo de 10,0mm (ABNT, 2008).

De acordo com Veríssimo (2007), o conector ideal é aquele que apresenta pequenas deformações em situações de serviço (ELS) e grandes deformações em estados limites últimos (ELU).

Os conectores *stud-bolt* são soldados ao perfil de aço por eletrofusão, seguindo as especificações da norma AWS C5.4 (AWS, 1993), que fala sobre *stud welding*, determinando as configurações de voltagem, corrente, tempo e propriedades da pistola, entre outras recomendações práticas.

De acordo com a norma americana AWS D1.5 (AWS, 2020), a superfície da viga que receberá os conectores deverá estar limpa e sem a presença de corrosões.

### 3.5.1 Propriedades mecânicas

Segundo o Anexo A da NBR 8800 (ABNT, 2008), os conectores de cisalhamento tipo pino com cabeça, usados na construção mista de aço e concreto devem ter dimensões e ser soldados aos perfis de aço de acordo com a AWS D1.1 (AWS, 2010).

Além disso, especifica que o aço estrutural utilizados nesses conectores com diâmetro de até 22,2 mm deve ser o ASTM A108-Grau 1020, devendo ser especificado com resistência ao

escoamento ( $f_{y_{cs}}$ ) de no mínimo 345 MPa, resistência à ruptura ( $f_{u_{cs}}$ ) maior que 415 MPa, alongamento mínimo em 50 mm de 20% e redução mínima de área de 50%.

O conector de cisalhamento utilizado nesse estudo tem as propriedades listadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Propriedades do aço A108.

Propriedade	Valor
Coeficiente de dilatação térmica ( $\beta_{cs}$ )	$1,26 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Coeficiente de Poisson ( $\nu_{cs}$ )	0,29
Densidade ( $\rho_{cs}$ )	$7,87E - 09 \text{ ton/mm}$
Módulo de Young ( $E_{cs}$ )	205.000MPa
Limite de escoamento ( $f_{y_{cs}}$ )	350 MPa
Limite de ruptura ( $f_{u_{cs}}$ )	450 MPa

### 3.6 CABOS DE PROTENSÃO

Os cabos de protensão de estruturas são obtidos por meio da trefilação de fios de aço duro, que quando unidos por três ou sete fios arrumados em forma de hélice formam uma cordoalha, como mostra a Figura 3.7.



Figura 3.7 - Produtos metálicos obtidos por trefilação.

Segundo Ferreira (2007), os cabos de protensão podem ter resistência até três vezes maior que os aços usados no concreto armado, já que possuem elevada resistência e não apresentam patamar de escoamento.

Os fios usados para a confecção de cabos de aço estruturais apresentam elevadas taxas de tensões residuais devido ao processo de trefilação, logo, para que possam ser utilizados, é necessária a realização de processos que reduzam essas tensões residuais. Dois desses processos são a relaxação normal (RN) onde o aço é aliviado por meio de um tratamento térmico que

elimina as tensões, ou a relaxação baixa (RB) em que o aço passa por um processo termomecânico onde se aplica tração enquanto aquecido.

### 3.6.1 Propriedade mecânicas

Neste presente trabalho, serão utilizadas as cordoalhas de sete fios do tipo CP 190 RB 12,7, que significa uma cordoalha de sete fios para concreto protendido (CP), categoria 190 (corresponde ao limite mínimo da resistência à tração na unidade kgf/mm<sup>2</sup>), relaxação baixa (RB) e diâmetro nominal de 12,7 mm (12,7).

De acordo com a norma NBR 7483 (ABNT, 2020), o módulo de elasticidade varia em função do material do fio, mas no caso de feio de aço-carbono comuns, pode-se utilizar o valor sendo 200 GPa.

Conforme o item 9.6.1.2.1-b da NBR 6118 (ABNT, 2014), a tensão  $\sigma_{pi}$  da armadura de protensão na saída do aparelho de tração segue conforme equação 3.2.

$$\sigma_{pi} \leq \begin{cases} 0,74f_{ptk} \\ 0,82f_{pyk} \end{cases} \quad (3.2)$$

Onde:  $f_{ptk}$  é a resistência à tração do cabo de protensão; e  $f_{pyk}$  é a tensão de escoamento do cabo. Pela NBR 7483 (ABNT, 2020), esse limite corresponde a tensão que, quando aplicada ao cabo de protensão, faz com que este apresente uma deformação residual de 0,2%.

Nesse caso, a carga mínima de ruptura é 183,7 kN e a resistência à tração e a tensão de escoamento seguem a relação da equação (3.3).

$$f_{pyk} = 0,9f_{ptk} \quad (3.3)$$

De acordo com Ferreira (2007), esses limites são aplicados para os casos de protensão em que ocorra pós-tração dos cabos, o que ocorre nas vigas metálicas protendidas. Tendo a função de evitar a ruptura do cabo durante a protensão, assim não ocorrerá elevada perda por relaxação do aço e formação de tensões excessivas.

Segundo Tokunaga (2020), deve-se assumir que a força de protensão para uma seção crítica é constante para todo o vão. Os diagramas de Magnel podem ser elaborados para as diversas

variações das seções ao longo do processo construtivo e para as diversas fases de carregamento, gerando bons resultados, utilizando as inequações da Tabela 3.4 para os dois casos de carregamento e dois limites de tensões.

Tabela 3.4 - Inequações para o diagrama de Magnel (TOKUNAGA, 2020).

Estágio	Inequação
I	$e_0 \leq k_i + (1/F_0)(M_m - \bar{\sigma}_{ti}W_s)$
II	$e_0 \leq k_s + (1/F_0)(M_m + \bar{\sigma}_{ci}W_i)$
III	$e_0 \geq k_i + (1/(F \text{ or } \eta F_0))(M_M - \bar{\sigma}_{cs}W_s)$
IV	$e_0 \geq k_s + (1/(F \text{ or } \eta F_0))(M_M + \bar{\sigma}_{ts}W_i)$
V	$e_0 \leq e_{0mp} = v - d_{cmin}$

### 3.7 DESVIADORES

Diversos são os tipos de desviadores existentes, dentre eles os principais modelos utilizados são pinos e chapas enrijecedoras, fazendo com que os cabos passem por pontos simétricos em relação à alma do perfil de aço. O modelo de desviador utilizado nessa pesquisa é o de chapas enrijecedoras soldadas à alma do perfil com um furo para passagem do cabo de protensão, como mostra a Figura 3.8.

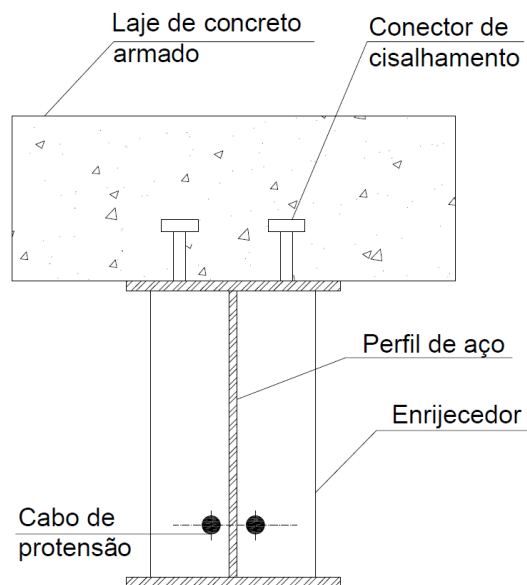


Figura 3.8 - Viga protendida com desviador enrijecedor.

### 3.8 ANCORAGEM DOS CABOS

Ancoragem é o dispositivo utilizado para fixar os cabos de protensão tensionados, de maneira que a carga aplicada ao cabo de aço seja mantida, impedindo que retorne ao seu estado original sem tensão.

Segundo Nelsen (2013), é necessário fazer adaptações do sistema de ancoragem usado em estruturas de concreto para estruturas de aço, para que os esforços dos cabos sejam transmitidos ao perfil metálico de forma segura e eficiente. Cunhas ou porca e rosca podem ser utilizados para fazer essa ancoragem.

Além disso, enrijecedores podem ser aplicados para melhorar a resposta local do perfil de aço e evitar a ruptura da peça nos pontos de ancoragem.

Em vigas biapoiadas, quando feita a ancoragem próxima aos apoios, é interessante posicionar cabos de forma que o centro de aplicação da força de protensão esteja próximo do centro de gravidade da seção da viga protendida (ALVES, 2018).

A ancoragem foi feita no enrijecedor, feito de aço e com espessura maior para garantir a vinculação adequada entre o cabo de protensão e a viga de aço, assim como ilustra a Figura 3.9.

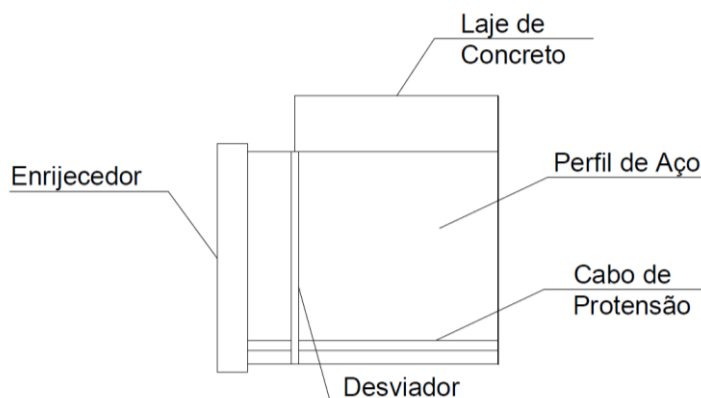


Figura 3.9 - Detalhe da vinculação do cabo de protensão no enrijecedor.

Ferreira (2007) afirmou em seu estudo que cabos com traçados retos e excêntricos podem ser ancorados antes dos apoios para evitar o surgimento de esforços indesejados na região do apoio.

Combinando todos esses componentes, forma-se a Viga Mista Alveolar Protendida (ViMAP).

## 4 METODOLOGIA

Com o intuito de alcançar os objetivos desse estudo, foi feito um estudo sobre o comportamento da ViMAP, então, com base nos dados obtidos na revisão bibliográfica e na fundamentação teórica, foi elaborado uma modelagem numérica através do Método de Elemento Finito (FEM) utilizando o *software* ABAQUS/CAE para as simulações numéricas não-lineares .

Uma vez que a ViMAP é o resultado da aplicação de diversas técnicas de construção; esta pesquisa analisou os diversos fatores que influenciam no comportamento dessa estrutura que pode apresentar grande resistência e potencial para aplicações práticas.

O modelo numérico tridimensional foi desenvolvido, calibrado e validado a partir dos dados obtidos por Silva (2018), nos quais fornecem informações fundamentais para utilização do modelo, pois levam em consideração as situações reais de execução das estruturas e as características especificadas dos materiais utilizados no país. As etapas desta fase incluíram a criação da geometria da viga alveolar com alvéolos hexagonais e circulares, definição das propriedades dos materiais (módulo de Young, coeficiente de Poisson, resistência à compressão e tração), implementação dos cabos de protensão no modelo, aplicação de conectores de cisalhamento entre a laje de concreto e o perfil de aço, além da definição das condições de contorno (apoios, restrições) e carregamentos (estáticos e dinâmicos).

Os resultados obtidos das simulações foram analisados para avaliar a distribuição de tensões nos alvéolos, desviadores dos cabos de aço, cabos de protensão, conectores de cisalhamento, alma e mesas da viga, e na laje de concreto armado. Também foram analisados os limites de deformações das vigas, comportamento estrutural sob diferentes tipos de alvéolos, resposta dinâmica das vigas em casos de ruptura hipotética dos cabos de protensão e estabilidade da alma da viga, especialmente em regiões com aberturas alveolares.

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma da metodologia científica utilizada nesse trabalho.



Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA

### 5.1 VIGAS MODELADAS

A escolha dos perfis modelados na análise numérica das vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAP), ilustrada na Figura 5.1, foi fundamentada nas características geométricas e estruturais observadas em aplicações práticas e nas necessidades específicas do estudo.

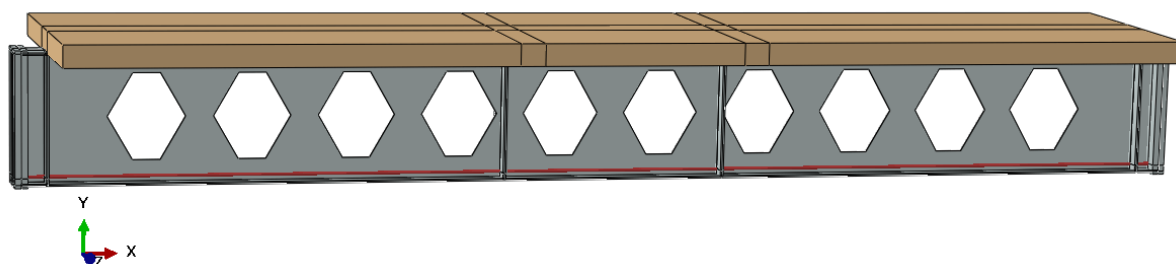


Figura 5.1 - ViMAP completa modelada.

Foram escolhidos 4 formatos de alvéolos para análise das tensões, sendo eles o circular, hexagonal, diamante e retangular. As vigas foram nomeadas inserindo três informações: se tem ou não protensão (SP - SEM Protensão ou Prot - COM Protensão), o formato do alvéolo (Circ, Hex, Diam ou Ret), o tipo da viga (1, 2 ou 3) e algumas alterações extras, como a redução do tamanho dos alvéolos, a remoção de alvéolos, a alteração dos espaçamentos dos alvéolos, a presença de mais desviadores intermediários e a alteração da posição desses desviadores, além da mudança da posição do cabo de protensão. Todos os detalhes de cada viga estarão nos seus respectivos subcapítulos.

Os formatos das vigas alveoladas foram definidos conforme segue:

**Padrão:** O modelo padrão utiliza um perfil de aço com seção I sem alvéolos.

**Tipo 1:** Neste formato, utiliza-se o perfil I de aço padrão, mantendo suas dimensões originais. Os alvéolos (aberturas) são inseridos no perfil, aumentando assim a altura final da viga. Esse processo visa melhorar a capacidade estrutural sem alterar a largura e peso do perfil original.



Tipo 2: Aqui, inicia-se com um perfil I de aço de dimensões menores. Após a inserção dos alvéolos, a altura final da viga resultante iguala-se à do perfil I de aço padrão. Esta abordagem permite utilizar um perfil mais leve inicialmente, compensando o aumento de altura proporcionado pelos alvéolos para alcançar as dimensões do perfil padrão.

Tipo 3: Este tipo utiliza um perfil I de aço comercial cujas dimensões são próximas às do tipo 2. Mantém-se o tamanho dos alvéolos constante, assegurando que a viga final possua características similares às do tipo 2. Foi utilizado o perfil W 200x31,3 para todos os modelos do tipo 3.

Todas as vigas têm um comprimento uniforme de 4827 mm e são combinadas com a mesma laje de concreto e distribuição de conectores. Em todos os casos a laje de concreto armado tem um comprimento menor do que o perfil de aço. Nos modelos protendidos, foi utilizado o mesmo cabo de protensão com as mesmas excentricidades.

## 5.2 RELAÇÕES CONSTITUTIVAS DOS MATERIAIS

As tensões e deformações de engenharia (nominais) devem ser convertidas para tensões e deformações verdadeiras antes de serem inseridas nos modelos constitutivos dos materiais no ABAQUS.

Esses valores podem ser calculados com as expressões descritas a seguir:

$$\sigma_{Ver} = \sigma_{Nom}(1 + \varepsilon_{Nom}) \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{Ver} = \ln(1 + \varepsilon_{Nom}) \quad (5.2)$$

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon_{Ver} - \frac{\sigma_{Ver}}{E} \quad (5.3)$$

Onde:  $\sigma_{Ver}$  a tensão verdadeira;  $\sigma_{Nom}$  a tensão nominal;  $\varepsilon_{Nom}$  a deformação nominal;  $\varepsilon_{Ver}$  a deformação verdadeira;  $\varepsilon^{pl}$  a deformação plástica verdadeira; e  $E$  o módulo de elasticidade do material considerado.

### 5.2.1 Concreto armado

As propriedades mecânicas do concreto armado seguem os valores da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades mecânicas do concreto.

Propriedade	Valor
$E_{cs}$ (MPa)	32.000
$f_{cm}$ (MPa)	40
$f_{ct}$ (MPa)	4
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2.500
Coefficiente de Poisson	0,2

Para melhor representar o comportamento do concreto armado, foi utilizado o modelo de plasticidade danificada do concreto. Além disso, será necessário a definição adicional de um modelo elástico em sua modelagem.

#### 5.2.1.1 Domínio Elástico

Para modelar o concreto no domínio elástico, foi utilizado o modelo de material *ELASTIC*, presente da biblioteca do ABAQUS, onde são necessários os parâmetros: módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Conforme Silva (2018), o módulo de elasticidade foi considerado 32000 MPa e o coeficiente de Poisson sendo 0,2.

#### 5.2.1.2 Domínio Plástico

Para melhor representar o comportamento do concreto armado, foi utilizado o modelo de plasticidade danificada do concreto (*Concrete Damaged Plasticity - CDP*), disponível na biblioteca de materiais do *software* ABAQUS.

O modelo CDP destina-se principalmente a fornecer uma capacidade geral para a análise de estruturas de concreto sob carregamento cíclico e/ou dinâmico. Sob baixas pressões de confinamento, o concreto comporta-se de forma frágil; os principais mecanismos de falha são a fissuração em tração e o esmagamento em compressão.

O modelo de dano plástico no ABAQUS utiliza a função de escoamento proposta por Lee e Fenves (1998), que é uma modificação do modelo de danos plásticos de Lubliner et al. (1989) considerando a evolução diferente da resistência sob tração e compressão do concreto.

Segundo Silva (2013), este modelo constitutivo permite caracterizar, de maneira realista, a relação tensão x deformação do concreto, especialmente a perda de rigidez a partir do ponto de sua resistência máxima.

No CDP são necessários parâmetros referentes à plasticidade, ao comportamento à compressão e ao comportamento à tração.

- Parâmetros plásticos

Cinco são os parâmetros solicitados pelo CDP, sendo eles: ângulo de dilatância ( $\psi$ ), excentricidade ( $\epsilon$ ), razão de tensão de transição ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ ), razão de tensão de fluxo ( $K_c$ ) e parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ).

- Ângulo de dilatância ( $\psi$ ):

O ângulo de dilatância é um parâmetro que define a relação entre a variação volumétrica e a deformação plástica de cisalhamento em materiais granulares, como o concreto. Em termos simples, ele descreve a tendência do material de expandir ou contrair quando sujeito a cisalhamento.

O ângulo de dilatância medido no plano em alta pressão de confinamento e é necessária para avaliar o potencial fluxo de plástico, que utiliza a função hiperbólica de Drucker-Prager. O ângulo de dilatação varia entre 0 e 56 (TAO; WANG; YU, 2013).

A escolha adequada do ângulo de dilatância é importante porque um valor errado de  $\psi$  leva à superestimação das deformações volumétricas e, por sua vez, a superestimação das deformações volumétricas no estado de deformação plana pode produzir um aumento artificial da capacidade de carga de toda a estrutura (SZCZECINA; WINNICKI, 2016).

Lee e Fenves (1998) constataram que quando o concreto foi submetido a falhas uniaxiais de compressão e de tração, tanto em ensaios monotônicos como cíclicos, um ângulo de dilatação de 31° produz resultados em boa concordância com os experimentais. No caso dos ensaios de carga biaxial, o ângulo de 31° produz uma pequena diferença na deformação fora do plano causada por uma dilatância maior em comparação com o ângulo de cerca de 25° (LEE; FENVES, 1998).

Silva (2013) analisou várias recomendações e concluiu que a diferença de comportamento do concreto é apenas marginal quando se utiliza valores entre 30° e 40°, sendo o valor ideal entre 35° e 38° para casos de alta tensão de confinamento.

Os principais ângulos de dilatação encontrados na literatura estão listados na Tabela 5.2

Tabela 5.2 - Ângulo de dilatação encontrado na literatura.	
Ângulo de dilatação	Bibliografia
15°	Szczecina, Tworzewski e Bacharz (2019).
30°	Abdelatif, Owen e Hussein (2015); Szczecina e Winnicki (2015).
31°	Yapar, Basu e Nordendale (2015); Hafezolghorani et al. (2017); Tawfik, Mahfouz e Taher (2021).
36°	Maia (2018); Alhammadi (2021).
38°	Jankowiak e Lodygowski (2005); Amadio, Akkad e Fasan (2015).
56°	Ozturk, Demir e Caglar (2016).

No presente trabalho, foi escolhido o valor do ângulo de dilatação  $\psi = 36^\circ$ , seguindo a escolha feita por Silva (2018).

- Excentricidade do potencial de fluxo ( $\epsilon$ ):

As relações tensão–deformação do concreto e a superfície de escoamento são relacionadas entre si utilizando a regra de escoamento. O modelo CDP no ABAQUS assume potencial de fluxo plástico não associativo com função hiperbólica de Drucker-Prager do potencial de fluxo  $G$  (ABAQUS, 2014).

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \Psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \Psi \quad (5.4)$$

Onde:  $G$  é o potencial de fluxo;  $\epsilon$  é a excentricidade;  $\sigma_{t0}$  é a tensão de tração uniaxial na falha;  $\Psi$  é o ângulo de dilatação;  $\bar{q}$  é a tensão efetiva equivalente de Mises; e  $\bar{p}$  é a pressão hidrostática de tensão.

Excentricidade potencial de fluxo ( $\epsilon$ ) designa a taxa na qual a função Drucker–Prager hiperbólica atinge a função Drucker–Prager linear, ou seja, a taxa na qual a função se aproxima

da assíntota. O valor de 0,1 garante que o material tem quase o mesmo ângulo de dilatação entre uma ampla faixa de valores de pressão de confinamento (ABAQUS, 2014).

- Razão de tensão de transição ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ ):

A razão entre a resistência à compressão equibiaxial inicial ( $f_{b0}$ ) à resistência à compressão uniaxial inicial ( $f_{c0}$ ) é responsável pela evolução das superfícies de escoamento. Esta razão contribui para a avaliação da função de escoamento proposta por Lubliner et al. (1989) e modificado por Lee e Fenves (1998). Este parâmetro varia entre 1,10 e 1,16 (ABAQUS, 2014). Apenas alguns autores (AMADIO; AKKAD; FASAN, 2015; JANKOWIAK; LODYGOWSKI, 2005) utilizaram o valor de 1,12. O valor predefinido de 1,16 é utilizado por muitos pesquisadores (LEE et al., 2020).

- Razão de tensão de fluxo ( $K_c$ ):

A razão ( $K_c$ ) da segunda tensão invariante no meridiano de tração ( $q_{TM}$ ) para aquela no meridiano de compressão ( $q_{CM}$ ) contribui para avaliar a função de escoamento. Varia entre 0,5 e 1 (SEOW; SWADDIWUDHIPONG, 2005). O valor típico da razão  $K_c$  para concreto é 2/3 (LUBLINER et al., 1989) e foi utilizado por muitos pesquisadores (LEE et al., 2020), sendo arredondado para 0,6667.

- Parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ):

Os modelos de materiais que apresentam comportamento de amolecimento e degradação da rigidez conduzem frequentemente a graves dificuldades de convergência em programas de análise implícitos. Algumas destas dificuldades de convergência podem ser superadas através de uma regularização viscoplástica das equações constitutivas. O modelo de plasticidade danificada do concreto pode ser regularizado usando viscoplasticidade, permitindo assim que as tensões fiquem fora da superfície de escoamento. Utiliza-se uma generalização da regularização de Duvaut-Lions, segundo a qual o tensor de taxa de deformação viscoplástica,  $\dot{\varepsilon}_v^{pl}$ , é definido como

$$\dot{\varepsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\varepsilon^{pl} - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.5)$$

Aqui  $\mu$  é o parâmetro de viscosidade que representa o tempo de relaxamento do sistema viscoplástico e  $\varepsilon^{pl}$  é a deformação plástica avaliada no modelo de backbone invíscido.

Da mesma forma, uma variável de degradação da rigidez viscosa,  $d_v$ , para o sistema viscoplástico é definido como

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu}(d - d_v) \quad (5.6)$$

Onde  $d$  é a variável de degradação avaliada no modelo de backbone invíscido. A relação tensão-deformação do modelo viscoplástico é dada como

$$\sigma = (1 - d_v)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_v^{pl}) \quad (5.7)$$

A solução do sistema viscoplástico relaxa para a do caso invíscido como  $t/\mu \rightarrow \infty$ , onde  $t$  representa o tempo. A utilização da regularização viscoplástica com um pequeno valor para o parâmetro de viscosidade (pequeno em comparação com o incremento de tempo característico) geralmente ajuda a melhorar a taxa de convergência do modelo no regime de amolecimento, sem comprometer os resultados.

O parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ) ajuda a fazer com que a rigidez tangencial do material degradante tenha um valor positivo para pequenos incrementos de tempo. O valor predefinido de zero (ABAQUS, 2014) causou o encerramento prematuro da análise devido aos danos ocorridos no elemento. De acordo com Tao et al. (2013),  $\mu$  não tem qualquer efeito significativo na precisão da análise.

A escolha do parâmetro de viscosidade baseou-se na escolha de Silva (2013), utilizando a viscosidade padrão do ABAQUS de 0 para o concreto armado modelado. Mesmo testando outros valores, foi constatado que alterar o parâmetro de viscosidade no modelo não gerou efeito significativo nos resultados.

Os principais parâmetros de viscosidade encontrados na literatura estão listados na Tabela 5.3

Tabela 5.3 - Parâmetro de viscosidade encontrado na literatura.

Viscosidade	Bibliografia
0	Silva (2013); Hafezolghorani et al. (2017); Silva (2018).
0,0001	Ozturk, Demir e Caglar (2016); Szczecina, Tworzewski e Bacharz (2019).
0,00015	Maia (2018).
0,0005	Alhammadi (2021).
0,0007	Tawfik, Mahfouz e Taher (2021).
0,001	Yapar, Basu e Nordendale (2015).
0,002	Jankowiak e Lodygowski (2005); Amadio, Akkad e Fasan (2015).
0,1	Abdelatif, Owen e Hussein (2015).

Portanto, após analisar cada um dos parâmetros plásticos solicitados para modelar o concreto armado, foram selecionados os valores mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Parâmetros plásticos para o uso do modelo CDP.

Parâmetro	Valor
Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	36°
Excentricidade ( $\epsilon$ )	0,1
$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	1,16
$K_c$	0,6667
Viscosidade ( $\mu$ )	0

- Parâmetros do concreto sob compressão

A relação entre  $\sigma_c$  e  $\epsilon_c$  mostrada na Figura 5.2 (tensão compressiva e deformação de encurtamento mostrada como valores absolutos) para carregamento uniaxial de curto prazo é descrita pela Equação (5.8), que foi fundamentada e extraída da norma EUROCODE 2 EN 1992-1-1:2004 (2004b). O concreto tem comportamento elástico linear até cerca de 40% da sua resistência média à compressão, ou seja, para uma tensão igual a  $0,4 f_{cm}$ , a partir desse ponto segue a Equação (5.8).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad \text{para } 0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}| \quad (5.8)$$

Sendo:  $\varepsilon_{c1}(\text{‰}) = 0,7f_{cm}^{0,31} < 2,80$ ;  $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$ ; e  $k = 1,05 E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$ ;

Onde:  $f_{cm}$  é o valor médio da resistência à compressão do concreto para o corpo de prova cilíndrico;  $\varepsilon_{c1}$  é a deformação no pico de compressão do concreto;  $\varepsilon_{cu1}$  é a deformação última à compressão do concreto; e  $E_{cm}$  é o módulo de elasticidade secante do concreto.

De acordo com a Tabela 3.1 da norma EUROCODE 2 (2004b), para um  $f_{cm} = 40 \text{ MPa}$ , tem-se:  $\varepsilon_{c1}(\text{‰}) = 2,197$  e  $\varepsilon_{cu1}(\text{‰}) = 3,5$ .

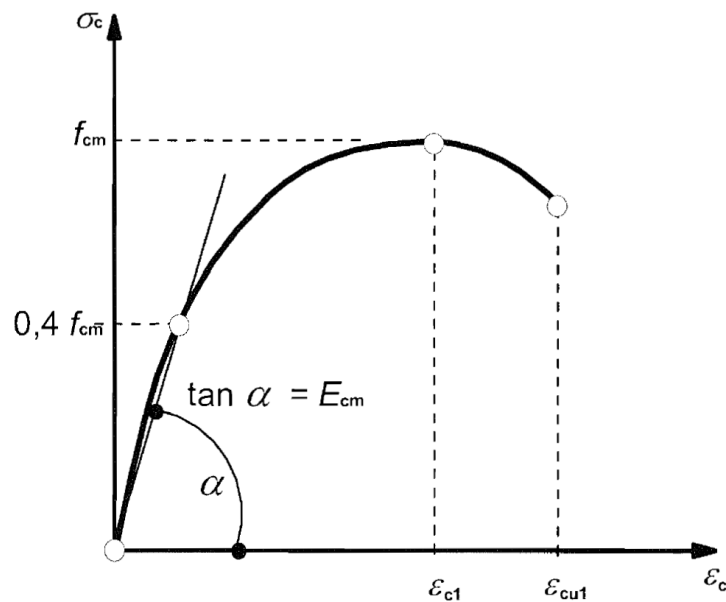


Figura 5.2 - Modelo constitutivo do concreto comprimido (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004b).

- Parâmetros do concreto sob tração

O comportamento não linear do concreto à tração é representado através da curva uniaxial apresentada na Figura 5.3. Nesta figura podem ser observados dois trechos distintos. O primeiro trecho da relação constitutiva possui um comportamento elástico linear até o limite de resistência à tração do concreto. Já o segundo trecho, é composto por uma curva não linear que é denominada curva “*tension stiffening*”. Esse trecho é influenciado pela taxa de armadura, onde é considerada a contribuição do concreto entre fissuras.



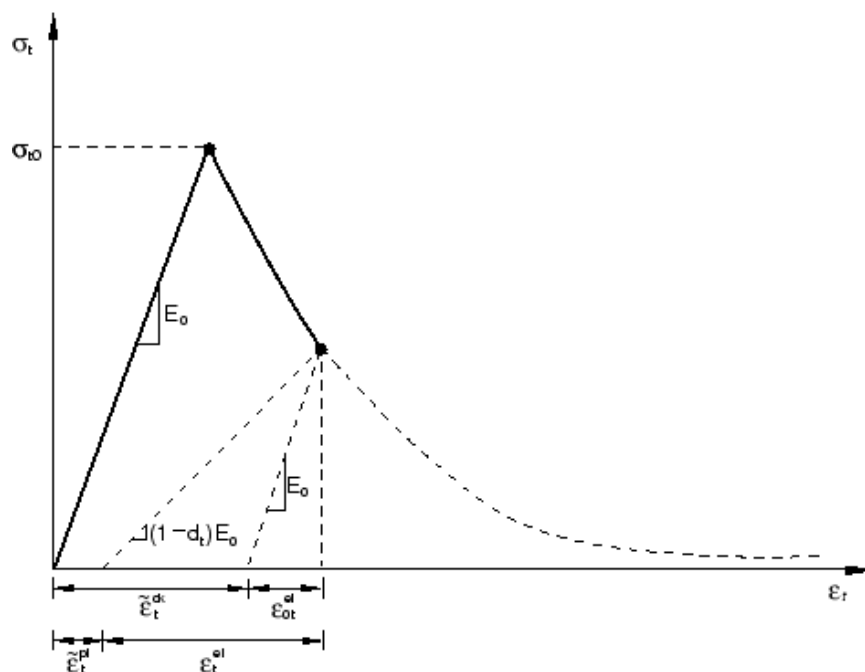


Figura 5.3 - Modelo constitutivo do concreto tracionado (ABAQUS, 2014).

O efeito *Tension Stiffening* na fase pós-pico da curva pode ser especificado por meio de uma relação tensão x deformação pós-falha ou por aplicação de um critério de energia de fratura. No manual do ABAQUS, informam que em casa com pouca ou nenhuma armadura, a abordagem através da relação tensão x deformação pode, muitas vezes, provocar resultados sensíveis à malha, prejudicando a convergência do modelo numérico. Portanto, segundo Silva (2013), o comportamento frágil do concreto foi caracterizado por uma resposta tensão x deslocamento (Figura 5.4), onde o deslocamento é determinado pela abertura de fissuras, o que não depende do comprimento do elemento nem do tamanho da malha.

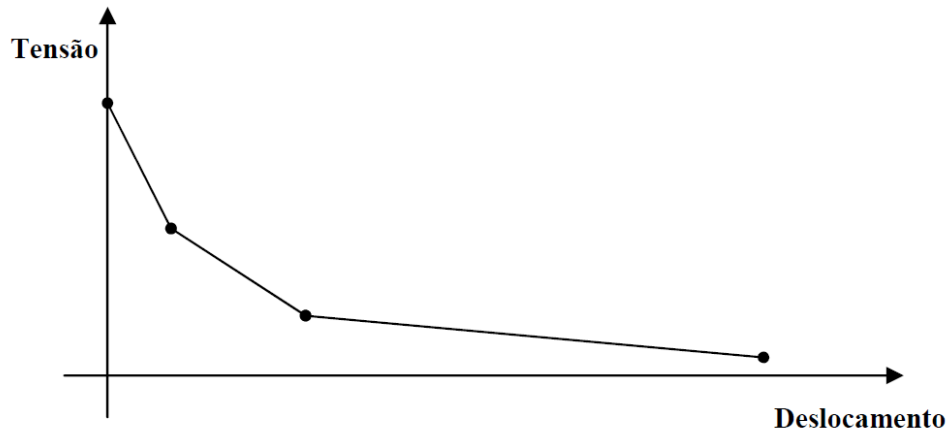


Figura 5.4 - Curva tensão x deslocamento na fase pós-pico (*Tension Stiffening*) admitida para o concreto tracionado no modelo numérico (SILVA, 2013).

Silva (2013) elaborou uma tabela com base em vários testes realizados utilizando diversos valores de deslocamento máximo, chegando ao valor de 0,50 mm. Os demais pontos da curva foram tomados mantendo a forma da curva tensão-deslocamento (Figura 5.4) proposta pelo *software* ABAQUS. Os pares estão mostrados na Tabela 5.5.

De acordo com Silva (2013) esse deslocamento é determinado por abertura de fissuras, não dependendo assim do comprimento do elemento e nem do tamanho da malha.

Tabela 5.5 - Pontos para definição do *Tension Stiffening* (SILVA, 2013).

$\sigma_t$ (MPa)	$u$ (mm)
$f_{ctm}$	0,00
$0,60 f_{ctm}$	0,05
$0,30 f_{ctm}$	0,15
$0,05 f_{ctm}$	0,50

Onde:  $\sigma_t$  é a tensão de enrijecimento;  $u$  é o deslocamento; e  $f_{ctm}$  é a resistência média à tração.

### 5.2.2 Perfil de aço

As propriedades mecânicas do aço utilizado no perfil seguem os valores da Tabela 5.6, como base nos valores usados por Silva (2018).

Tabela 5.6 - Propriedades mecânicas do perfil de aço.

Propriedade	Valor
$E$ (MPa)	215.000
$f_y$ (MPa)	411,6
$f_u$ (MPa)	565,4
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7.850
Coeficiente de Poisson	0,3

Segundo Han, Zhao e Tao (2001), uma curva tensão x deformação típica para aço pode consistir em cinco estágios, representando a não linearidade física do material, conforme mostrado na Figura 5.5. É admitido que o aço desenvolva deformações plásticas a partir do momento em que é atingida a sua tensão de proporcionalidade ( $f_p$ ), e que ocorre um acréscimo de tensões após o escoamento do aço ( $f_y$ ) até atingir a tensão de ruptura ( $f_u$ ). Essa relação constitutiva permite simular as etapas de plastificação do aço, que incluem: o regime linear, a tensão de proporcionalidade, os patamares de escoamento, o encruamento e os limites de tensão e deformação que caracterizam o colapso (SILVA, 2018).

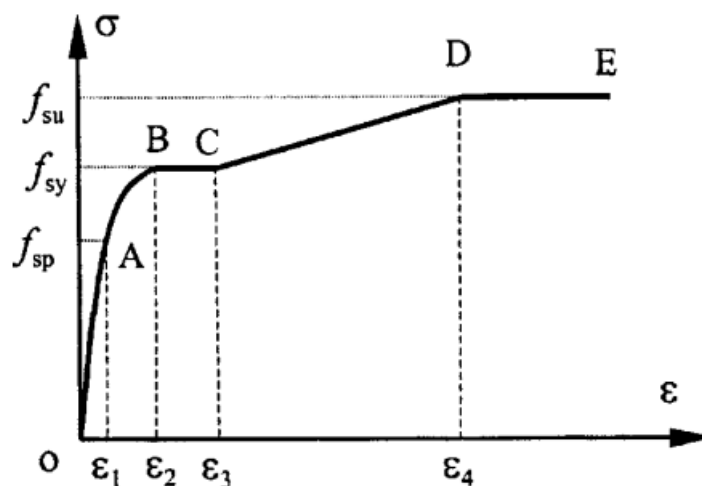


Figura 5.5 – Diagrama da curva típica de tensão-deformação do aço fora de escala (HAN; ZHAO; TAO, 2001).

Expressões que representam cada um dos trechos da relação constitutiva são dadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Equações da curva típica de tensão-deformação do aço (HAN; ZHAO; TAO, 2001).

Trecho	Equação	Intervalo
Trecho O - A	$\sigma = E_s \cdot \varepsilon$	Para $\varepsilon \leq \varepsilon_1$
Trecho A - B	$\sigma = f_p + \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot (f_y - f_p)$	Para $\varepsilon_1 < \varepsilon \leq \varepsilon_2$
Trecho B - C	$\sigma = f_y$	Para $\varepsilon_2 < \varepsilon \leq \varepsilon_3$
Trecho C - D	$\sigma = f_y \cdot (f_u - f_y) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_3}{\varepsilon_4 - \varepsilon_3} \right)$	Para $\varepsilon_3 < \varepsilon \leq \varepsilon_4$
Trecho D - E	$\sigma = f_u$	Para $\varepsilon > \varepsilon_4$

Sendo:  $\varepsilon_1 = 0,8 \frac{f_y}{E_s}$ ,  $\varepsilon_2 = 1,5 \cdot \varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_3 = 10 \cdot \varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_4 = 100 \cdot \varepsilon_2$  e  $f_p = 0,8 f_y$ .

### 5.2.3 Armadura passiva

As propriedades mecânicas do aço utilizado na armadura passiva seguem os valores da Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Propriedades mecânicas da armadura passiva.

Propriedade	Valor
$E$ (MPa)	200.000
$f_{yk}$ (MPa)	500
Densidade (kg/m³)	7.850
Coefficiente de Poisson	0,3

A armadura passiva utilizada na laje de concreto armado foi modelada de acordo com o diagrama de tensão x deformação indicado no item 8.3.6 da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) e ilustrado na Figura 5.6. Este diagrama simplificado representa o aço no modelo elastoplástico perfeito, e serve para o cálculo nos estados-limite de serviço e último, funcionando para aços com ou sem patamar de escoamento. O valor da deformação última adotada foi de 0,01 (SILVA, 2018).

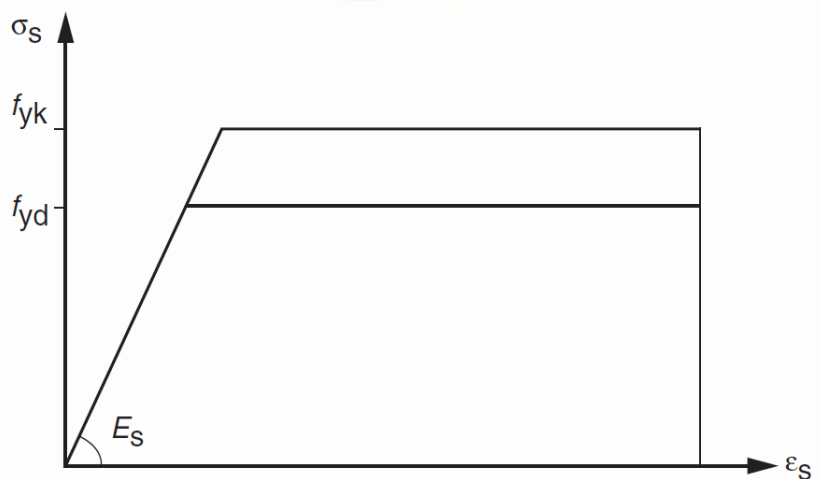


Figura 5.6 – Diagrama típico tensão-deformação para aços de armadura passiva (ABNT, 2014).

#### 5.2.4 Conectores de cisalhamento

As propriedades mecânicas do aço utilizado nos conectores de cisalhamento seguem os valores da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Propriedades mecânicas do conector de cisalhamento.

Propriedade	Valor
$E$ (MPa)	206.000
$f_y$ (MPa)	345
$f_u$ (MPa)	415
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7.850
Coefficiente de Poisson	0,3

A representação da não linearidade dos conectores foi realizada através do diagrama bi-linear com encruamento isotrópico, conforme foi utilizado por Kotinda (2006), apresentado na Figura 5.7.

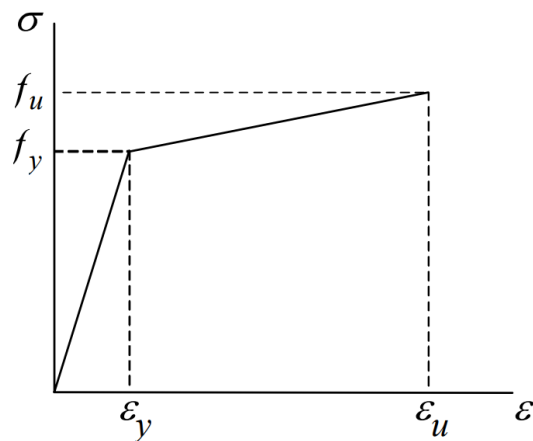


Figura 5.7 - Diagrama tensão x deformação para aço do conector de cisalhamento (KOTINDA, 2006).

### 5.2.5 Armadura ativa

As propriedades mecânicas do aço do cabo de protensão utilizado na armadura ativa seguem os valores da Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Propriedades mecânicas da armadura ativa.

Propriedade	Valor
$E$ (MPa)	200.000
$f_y$ (MPa)	1.620
$f_u$ (MPa)	2.017
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	7.850
Coeficiente de Poisson	0,3

A armadura ativa é o aço de protensão que tem seu modelo constitutivo representado pelo diagrama tensão x deformação bi-linear simplificado (REN et al., 2015), também contido no item 8.4.5 da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), conforme indica a Figura 5.8.

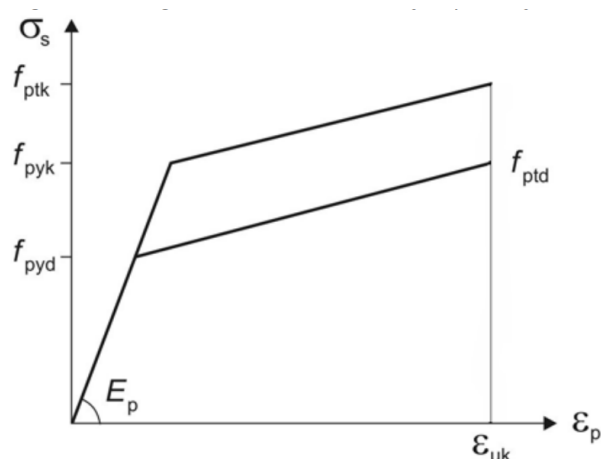


Figura 5.8 - Diagrama tensão x deformação para aços de armadura ativa (ABNT, 2014).

### 5.3 DISCRETIZAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS

Os materiais são representados com base em elementos finitos predefinidos incluídos na biblioteca do *software* ABAQUS, e foram escolhidos nesta pesquisa com base no comportamento global do elemento, no esforço computacional gerado, no número de graus de liberdade e nos estudos que compõem a revisão literária.

A laje de concreto armado foi modelada utilizando um elemento do tipo *SOLID*, que é o elemento adequado e utilizado na modelagem de peças volumétricas e com um único material homogêneo, pode ser usado para análises lineares e para análises não lineares complexas envolvendo contato, plasticidade e grandes deformações. Além disso, apresenta características que representam bem o material, como o surgimento de fissuras quando o esforço for de tração e esmagamento quando for compressão. E permite ainda que sejam inseridas barras de armadura em seu interior, na forma discreta ou em forma de taxas, para representação do concreto armado.

Neste trabalho, foi escolhido o elemento *SOLID C3D8R* (Figura 5.9), que significa o elemento Contínuo, 3D, com 8 nós e integração Reduzida. Cada um dos 8 nós possuem três graus de liberdade, sendo translações nas direções x, y e z. Os elementos de integração reduzida de segunda ordem no ABAQUS/Standard geralmente produzem resultados mais precisos do que os elementos totalmente integrados correspondentes (ABAQUS, 2014).

Diversos autores também utilizaram esse tipo de elemento na modelagem de lajes de concreto armado, como Mirza e Uy (2010), Prakash et al. (2011), Wang et al. (2018), Silva (2013), Zhou et al. (2018), Alhammadi (2021).

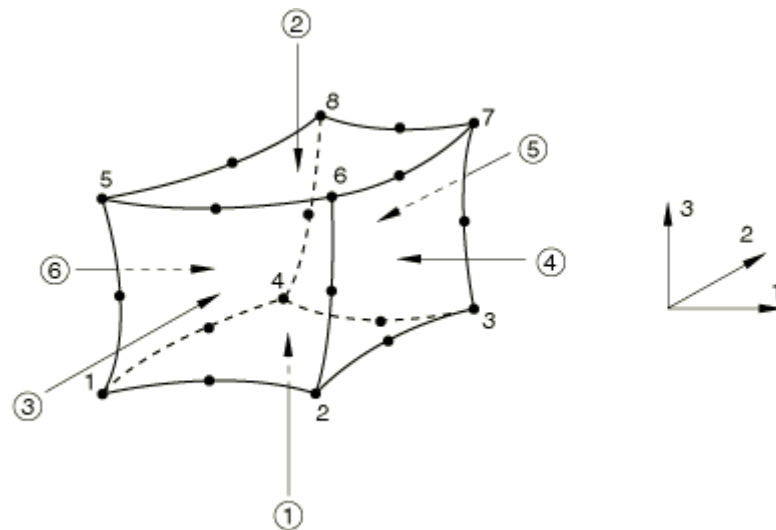


Figura 5.9 - Elemento SOLID C3D8R (ABAQUS, 2014).

O perfil de aço foi modelado utilizando o elemento SHELL S4R (Figura 5.10), que é um elemento de casca duplamente curvada de 4 nós, integração reduzida, controle de ampolheta e tensões de membrana finitas, com espessuras moderadas e podem ser curvas ou lineares. Cada um dos 4 nós possuem 6 graus de liberdade sendo translações nas direções dos eixos x, y e z e rotações em torno dos eixos x, y e z.

Segundo Ellobody (2012), uma vez que a flambagem lateral de vigas de aço celulares é muito sensível a grandes cargas, o elemento S4R foi utilizado em seu estudo para garantir a precisão dos resultados. Além disso, apresenta fluência, plasticidade, grande flecha e grande capacidade de deformação, ideal para simular o perfil metálico.

Apesar de ter alguns autores que modelam esse tipo de viga com o elemento SOLID C3D8R (BI et al., 2021; MOHEBKHAH; AZANDARIANI, 2020; PRAKASH et al., 2011; SILVA, 2013), o elemento SHELL S4R é utilizado para simplificação do modelo e diminuir o custo computacional (FRANS et al., 2017; GIZEJOWSKI; SALAH, 2011; HADJIPANTELIS; GARDNER; WADEE, 2019; JIA et al., 2020; MIRZA; UY, 2010; SILVEIRA, 2011; THOMAS; BASKAR, 2018; WANG; WANG; MA, 2014; ZHOU et al., 2018).



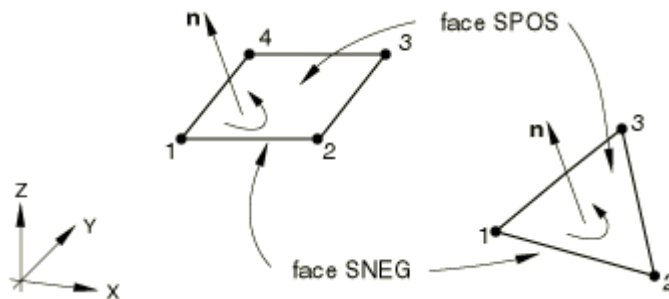


Figura 5.10 - Elemento SHELL S4R (ABAQUS, 2014).

As barras de aço e os cabos de protensão do modelo (armadura ativa e passiva) foram modelados utilizando o elemento TRUSS T3D2 (Figura 5.11), que é um elemento de barra sujeito a esforços uniaxiais de tração ou compressão, que não possui rigidez para resistir aos esforços perpendiculares ao seu eixo. Um elemento de treliça reta de 2 nós, que usa interpolação linear para posição e deslocamento e tem uma tensão constante, definido pela área da seção transversal, por uma deformação inicial, caso seja necessário, e pelas propriedades isotrópicas do material. Cada nó do elemento é composto por três graus de liberdade, sendo translações nas direções dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

O elemento T3D2 foi amplamente utilizado para modelar os cabos de aço protendidos e armaduras (ALHAMMADI, 2021; BI et al., 2021; HADJIPANTELIS; GARDNER; WADEE, 2019; MIRZA; UY, 2010; REN et al., 2015; SILVA, 2013; WANG et al., 2018).



Figura 5.11 - Elemento TRUSS T3D2 (ABAQUS, 2014).

Os conectores de cisalhamento foram modelados com o elemento de viga BEAM B31 (Figura 5.12), que possui 2 nós e 6 graus de liberdade por nó, sendo translações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e rotações em torno de  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Este elemento é chamado de vigas Timoshenko, as quais são flexíveis ao cisalhamento, ou seja, permitem a deformação por cisalhamento transversal. Eles podem ser usados para vigas grossas (“robustas”), bem como vigas delgadas.

O elemento B31 foi adotado pela simplicidade existente em sua utilização, além de permitir que sua forma seja configurada, que no caso deste estudo é circular. O elemento responde de

forma efetiva a esforços de flexão e permite ainda a consideração da não linearidade do material. ABAQUS (2014) assume que o comportamento de cisalhamento transversal das vigas de Timoshenko é elástico linear com um módulo fixo e, portanto, independente da resposta da seção da viga ao alongamento axial e à flexão.

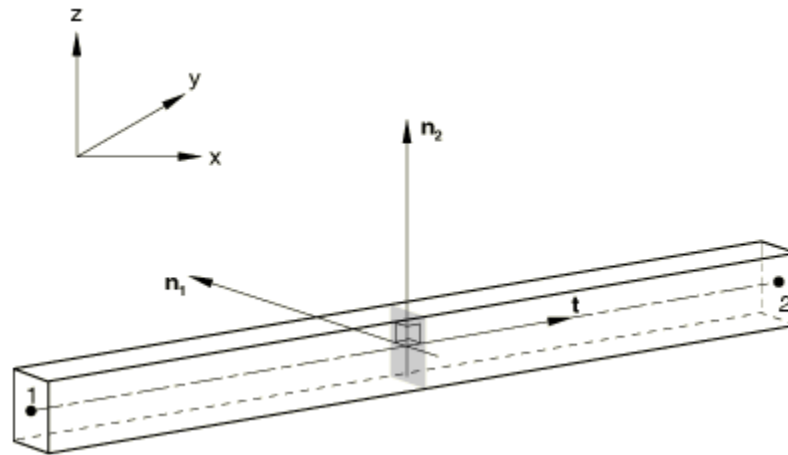


Figura 5.12 - Elemento BEAM B31 (ABAQUS, 2014).

O conector de cisalhamento foi discretizado em quatro elementos, sendo um destinado para a cabeça do conector e os outros três para o corpo do conector, como mostra a Figura 5.13. O último elemento localizado na extremidade inferior do conector, região em contato com o perfil de aço, foi criado para evitar erros relacionados à vinculação do conector, separando assim, a região do conector em contato com o perfil de aço e em contato com a laje de concreto. As espessuras do corpo e da cabeça dos parafusos foram especificadas para cada elemento correspondente.

Além disso, o restante do copo do conector foi dividido em dois elementos, segundo Kotinda (2006), a principal transferência de esforços cisalhantes ocorre na metade inferior do corpo do conector sobre a laje de concreto.

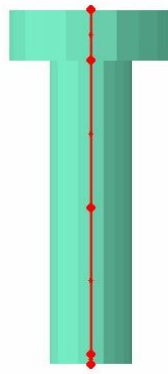


Figura 5.13 - Discretização do conector de cisalhamento.

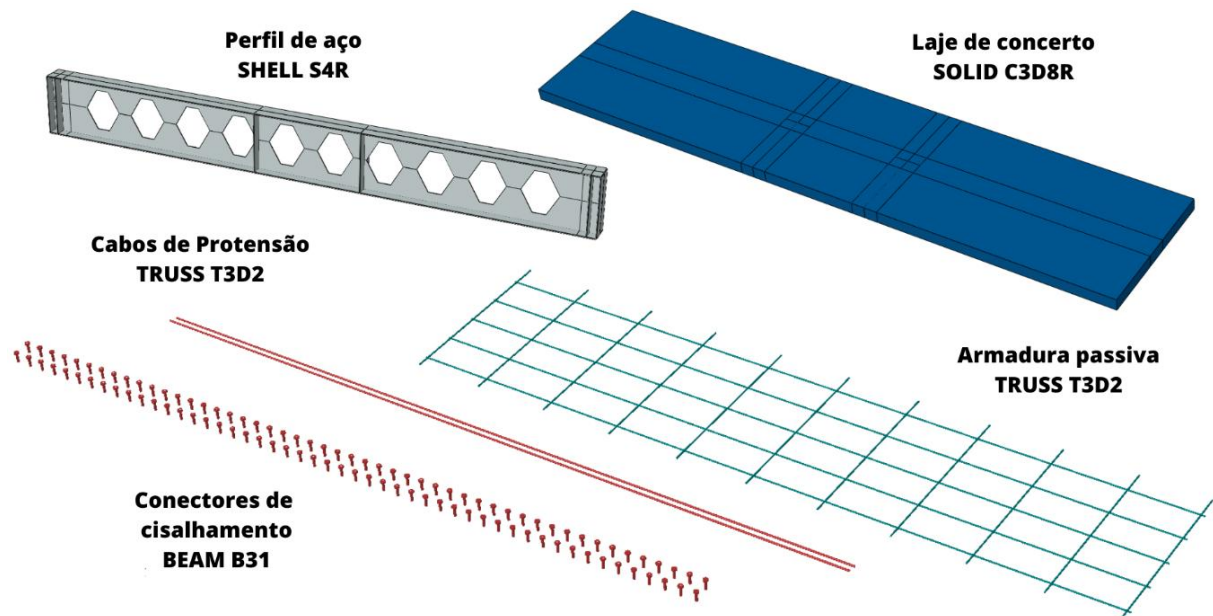


Figura 5.14 - Peças modeladas e seus elementos.

#### 5.4 DISPOSIÇÃO DA MALHA

Os resultados obtidos com o uso do modelo de dano plástico do concreto mostraram sensibilidade à disposição da malha, uma vez que o modelo é influenciado pela largura da zona de concreto fissurado (ABAQUS, 2014; HILLERBORG; MODÉER; PETERSSON, 1976; KOEBERL; WILLAM, 2008; LEE; FENVES, 1998). Portanto, a resposta global pode variar quando diferentes tamanhos de elementos são empregados para modelar a direção normal à fissura (LEE; FENVES, 1998).

De acordo com a pesquisa realizada por Bakhti et al. (2022) sobre os parâmetros para modelagem do concreto no modelo de dano plástico, as curvas tensão-deformação e a evolução dos parâmetros de material do CDP são independentes do efeito do tamanho da malha ( $L_{eq}$ ). Esse tamanho característico do elemento da malha seria calculado pela Eq. (5.9).

$$L_{eq} = \frac{b_c G_{ch}}{f_{c0}(1 + 0,5a_c)} \quad (5.9)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} f_{c0} &= 0,4f_{cm} \\ f_{cm} &= f_{ck} + 8 \\ G_{ch} &= \left(\frac{f_{cm}}{f_{tm}}\right)^2 G_F \\ f_{tm} &= 0,3016f_{ck}^{2/3} \\ G_F &= 0,073f_{cm}^{0,18} \end{aligned} \quad (5.10)$$

E para o concreto de  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ , os autores determinam que  $a_c = 7,873$  e  $b_c = 652,439$ . Logo,  $L_{eq} = 196 \text{ mm}$ .

Onde:  $f_{c0}$  é a tensão a compressão a zero esmagamento ( $\varepsilon_c^{in} = 0$ );  $f_{cm}$  é a deformação inelástica de compressão;  $f_{tm}$  é a deformação inelástica de tração;  $G_{ch}$  é a energia de esmagamento por unidade de área;  $G_F$  é a energia de fratura por unidade de área;  $a_c$  e  $b_c$  são coeficientes adimensionais avaliados a partir da correlação das energias de tração/compressão por unidade de volume dissipada pelo dano ao longo de todo o processo de deterioração;  $L_{eq}$  é o tamanho da malha (comprimento característico do elemento finito). Para um elemento de sólido,  $L_{eq}$  é tomado como o volume dividido pela maior área da face.

Wang, Wang e Ma (2014) compararam três densidades de malha (Figura 5.15), com espaçamentos de 30 mm, 10 mm e 5 mm, concluindo que o espaçamento de 30 mm proporcionou precisão suficiente. Eles observaram que o número de elementos pode ser reduzido em até 75% em comparação com a malha de 10 mm.

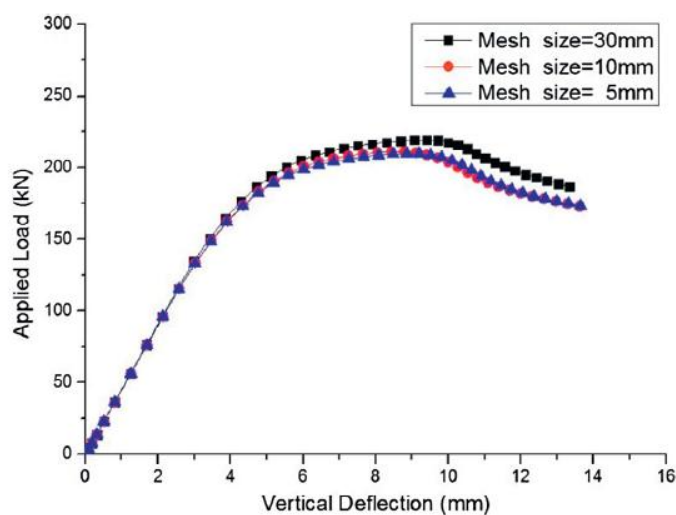
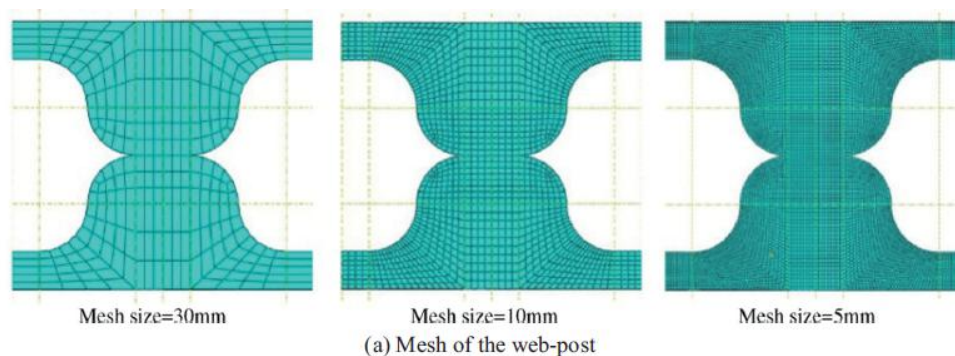


Figura 5.15 - Curva carga-deslocamento da alma variando o tamanho da malha (WANG; WANG; MA, 2014).

Alhammadi (2021) estudou que a alma de uma viga de aço foi particionada com tamanho máximo de elemento de 20 mm. Todos os banzos de vigas de aço foram divididos com um tamanho máximo de elemento de 20 mm. O tamanho do elemento do pino foi escolhido para ser de 4 mm. As barras de reforço foram engrenadas com um tamanho de elemento de 100 mm. O tamanho dos elementos de concreto variou de 15 a 25 mm.

Para a malha grossa,  $l_{ch} = 10 \text{ mm}$  é um tamanho máximo de elemento acima do qual vários fenômenos físicos locais não podem ser descritos com precisão. Para a malha densa,  $l_{ch} = 5 \text{ mm}$  é um tamanho mínimo de elemento do ponto de vista de custo computacional (FEDOROFF; CALONIUS, 2020).

Quanto as dimensões das malhas dessa pesquisa, foi utilizada uma malha com dimensões de aproximadamente 40x40x45 mm nos elementos sólidos da laje de concreto, mantendo uma dimensão mais uniforme possível, como mostra a Figura 5.16.

Foram feitos testes com malhas mais refinadas, no entanto, a melhora dos resultados não foi significativa e o aumento do esforço computacional não compensa a alteração.

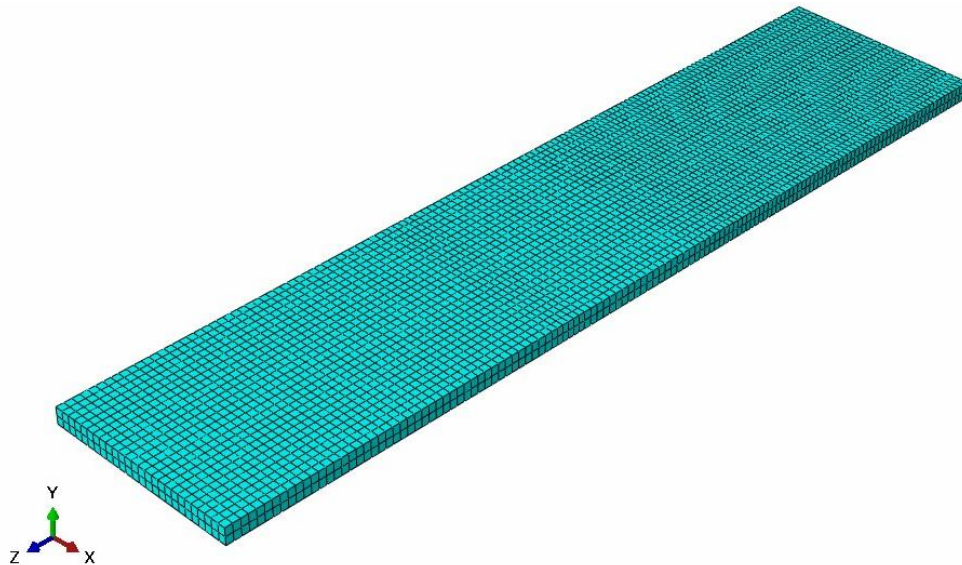


Figura 5.16 - Disposição da malha da laje de concreto armado.

Nos elementos de casca do perfil I de aço, adotou-se uma dimensão de 40x40 mm, sendo 20 mm nas bordas dos alvéolos (Figura 5.17). Esta redução é essencial para obter resultados mais precisos nas arestas retas do corte, mantendo uma discretização alinhada com as condições reais da estrutura.

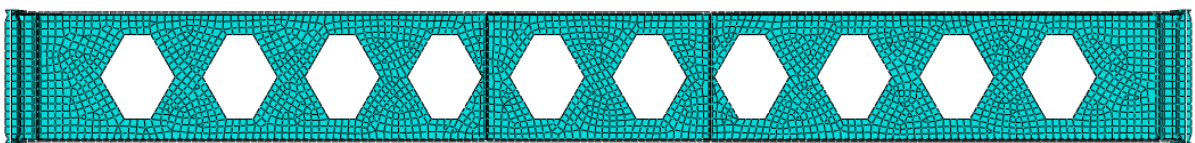


Figura 5.17 - Disposição da malha do perfil I de aço.

Os elementos do conector de cisalhamento foram discretizados em malha com aproximadamente 5 mm de dimensão, como mostra a Figura 5.18.

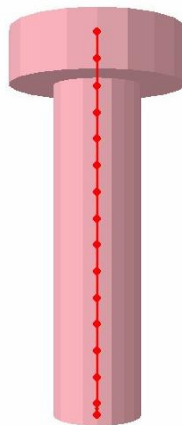


Figura 5.18 - Malha do conector de cisalhamento.

A armadura passiva, longitudinal e transversal, foi discretizada seguindo aproximadamente a divisão de elementos da laje de concreto, sendo adotada uma dimensão de 20 mm.

Os elementos dos cabos de protensão, armadura passiva, foram divididos para coincidirem os desviadores intermediários, e a malha foi discretizada com aproximadamente 22 mm de dimensão, como mostra a Figura 5.19.



Figura 5.19 - Discretização cabo de protensão.

## 5.5 INTERAÇÕES DE CONTATO

Diversas são as interações entre elementos no modelo, segue abaixo todos os conjuntos de contato utilizados:

- Armadura passiva - Laje de concreto: Para a interação da armadura passiva de aço (transversal e longitudinal) e a laje de concreto armado, foi utilizada a restrição “*Constrain*” do tipo “*Embedded region*”, sendo a armadura a região imersa e a laje a região hospedeira, como mostra a Figura 5.20. Esse método é usado para especificar um elemento ou um grupo de elementos que estão embutidos em um grupo de elementos hospedeiros cuja resposta será usada para restringir os graus de liberdade translacionais dos nós embutidos (ABAQUS, 2014), ou seja, o movimento de translação dos elementos da armadura passiva ficam restringidos aos movimentos com valores interpolados aos



correspondentes graus de liberdade dos elementos da laje de concreto. Diversos autores também utilizaram esse método (BI et al., 2021; ROSSI et al., 2020; SILVA, 2018; WANG et al., 2018).

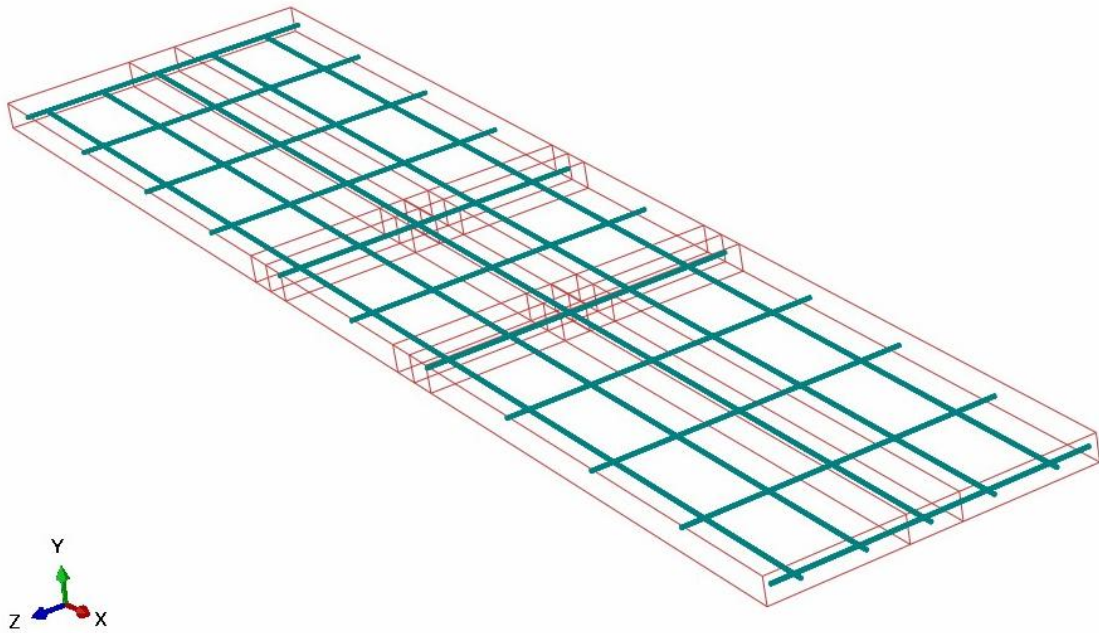


Figura 5.20 - Interação entre armadura passiva e laje de concreto.

Foram implementados dois métodos de conexão entre o perfil de aço e a laje de concreto. O método mais simples foi a restrição TIE, que impede todos os movimentos do trecho restringido. O método mais complexo envolveu a modelagem do conector de cisalhamento. Ambas as abordagens foram essenciais para comparar a carga computacional com os resultados do modelo, influenciando diretamente a distribuição das tensões nas vigas simuladas. Posteriormente, esses métodos foram comparados.

- Perfil de aço - Laje de concreto (*TIE*): Uma forma de modelar a conexão do perfil de aço com a laje de concreto é a utilização da restrição “*Tie constrain*”, onde é necessário determinar a superfície *master* (parte superior do perfil de aço) e superfície *slave* (parte inferior da laje de concreto), como mostra a Figura 5.21. Essa é uma restrição de amarração que une duas superfícies separadas de modo que não haja movimento relativo entre elas, onde permite fundir duas regiões, mesmo que as malhas criadas nas superfícies das regiões possam ser diferentes (ABAQUS, 2014), ou seja, forma uma restrição rígida entre as peças, impedindo qualquer grau de liberdade.



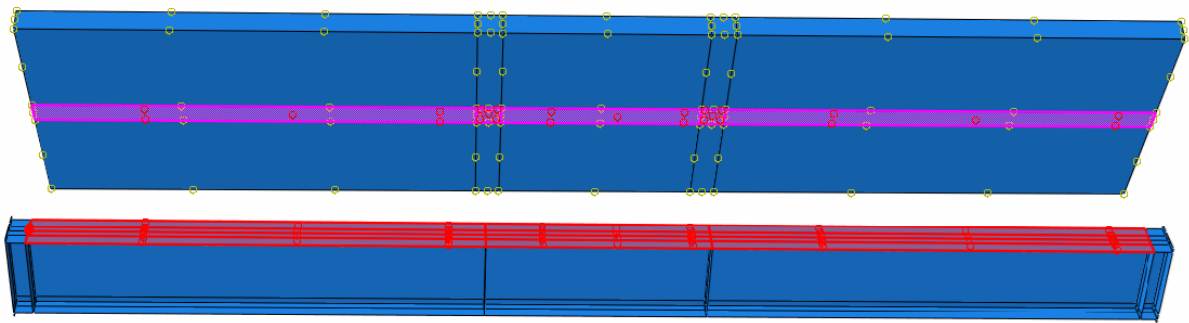


Figura 5.21 - Interação entre perfil de aço e laje de concreto com “Tie constrain”.

- Perfil de aço - Laje de concreto (*CONNECTOR*): Outra forma fazer a união do perfil de aço com a laje de concreto é modelando os conectores de cisalhamento. Nesse caso, será necessário a criação de interação de contato entre a superfície do topo do perfil de aço e a superfície da parte inferior da laje de concreto armado. Foi criada a interação do tipo contato “*surface-to-surface*” sendo a superfície do perfil de aço a *master* e a superfície da laje de concreto a *slave*. As propriedades do contato foram o comportamento normal definido como “*hard contact*”, fazendo com que a penetração da superfície *slave* na superfície *master* seja imperceptível, e o comportamento tangencial da formulação de atrito “*penalty*” e com coeficiente de atrito igual a 0,4 (MONTEIRO, 2021; ROSSI et al., 2020; SILVA, 2018; WIJESIRI PATHIRANA et al., 2016).

Além disso, foi modelado o conector de cisalhamento para garantir a vinculação do perfil de aço com a laje de concreto. Nessa situação, o conector terá dois tipos de interações, sua base com o perfil de aço e seu corpo com a laje de concreto. Foram feitos os seguintes acoplamentos:

- Perfil de aço - Conector de cisalhamento: Foi feita um acoplamento do tipo “*Tie Constrain*” entre os nós da base dos conectores e a superfície superior do perfil de aço, como mostra a Figura 5.22. Essa restrição permite a vinculação de modo que todos os graus de liberdade foram restringidos, sendo o método de descrição “*node to surface*”, a superfície *master* é a parte superior do perfil de aço e a superfície *slave* é a base do conector. Conforme Xing et al. (2016), os pinos podem falhar no modo de cisalhamento, força de arrancamento foi muito pequena em comparação com a força de cisalhamento, e a falha de arrancamento

não ocorreu. Esta técnica se mostrou eficiente em diversos estudos (GIL; GOÑI; BAYO, 2013; SILVA, 2018, 2013; XING et al., 2016).

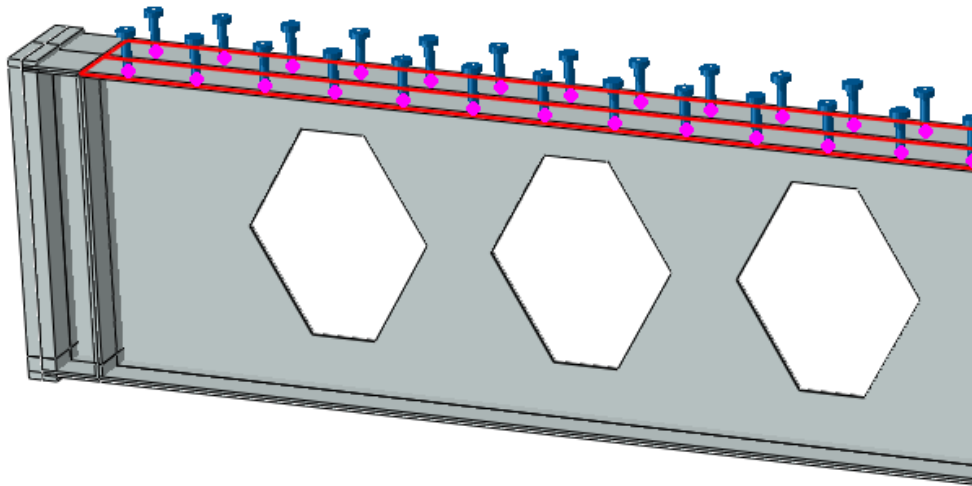


Figura 5.22 - Interação entre perfil de aço e conectores de cisalhamento.

- Laje de concreto - Conector de cisalhamento: A interação entre a laje de concreto e o conector de cisalhamento é feita utilizando o comando “*Embedded constrain*”, como mostra a Figura 5.23. Semelhante a laje de concreto armado, nessa situação é definida a região *embedded* como sendo o conector de cisalhamento e a região *host* a laje de concreto. Outros autores também utilizaram essa técnica com sucesso (GIL; GOÑI; BAYO, 2013; SILVA, 2018; XING et al., 2016).

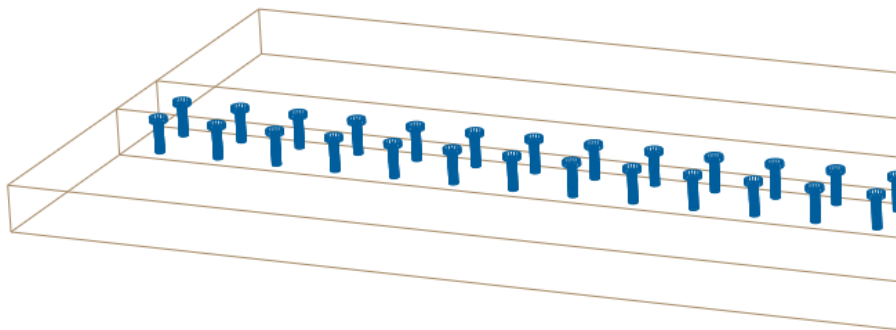


Figura 5.23 - Interação entre laje de concreto e conectores de cisalhamento.

A conexão do cabo de protensão com o perfil de aço é feita a partir de duas vinculações, uma com o enrijecedor de borda e outra com os desviadores intermediários.

- Cabo de protensão / enrijecedor: A conexão entre o cabo de protensão e os enrijecedores de borda foi realizada utilizando a restrição do tipo *TIE*, conforme ilustrado na Figura 2.28. Essa abordagem permitiu unir o cabo aos enrijecedores, restringindo todos os graus de liberdade, de forma que os esforços de protensão fossem adequadamente transmitidos para a viga. Para garantir uma vinculação eficaz, foi necessário aplicar a restrição em toda a superfície de contato do enrijecedor, uma vez que vincular apenas um nó causava problemas de convergência no modelo numérico. Como exigido pela definição dessa restrição, foi preciso selecionar duas superfícies: o enrijecedor foi definido como a superfície *master*, enquanto as extremidades do cabo foram configuradas como a superfície *slave*. Essa vinculação foi feita em ambos os cabos nas duas extremidades da viga.

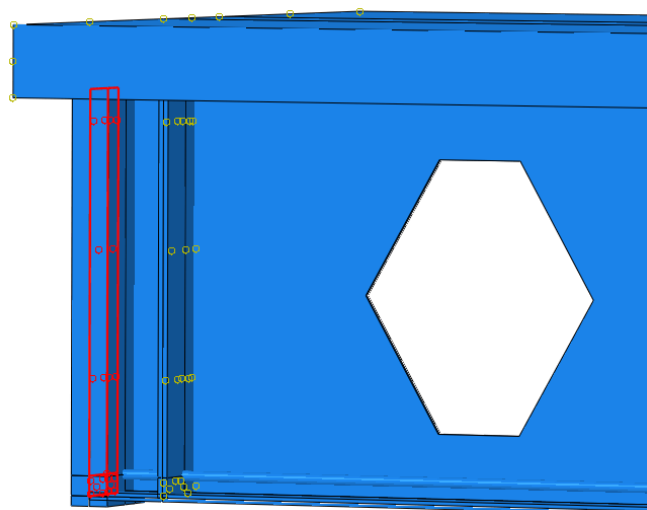


Figura 5.24 - Vinculação do cabo de protensão com o enrijecedor.

- Cabo de protensão / desviadores: essa vinculação foi feita em duas partes, na primeira foi criado um ponto de referência (*Reference Point*) acoplado por meio do *tie* ao desviador (cada um de maneira individual), com todos os seus graus de liberdade fixados, sendo o desviador a superfície *master* e o ponto de referência o *slave*, como mostra a Figura 5.25. Em seguida, foi feita a conexão por meio do efeito *Coupling* do módulo *Interaction* do ABAQUS, vinculando o ponto de referência à superfície da extremidade do cabo de protensão, ilustrado na Figura 5.26, permitindo apenas a translação na direção U1(x), admitindo que o cabo de protensão se mova livremente ao longo de seu eixo longitudinal, como exigido pela função dos desviadores.

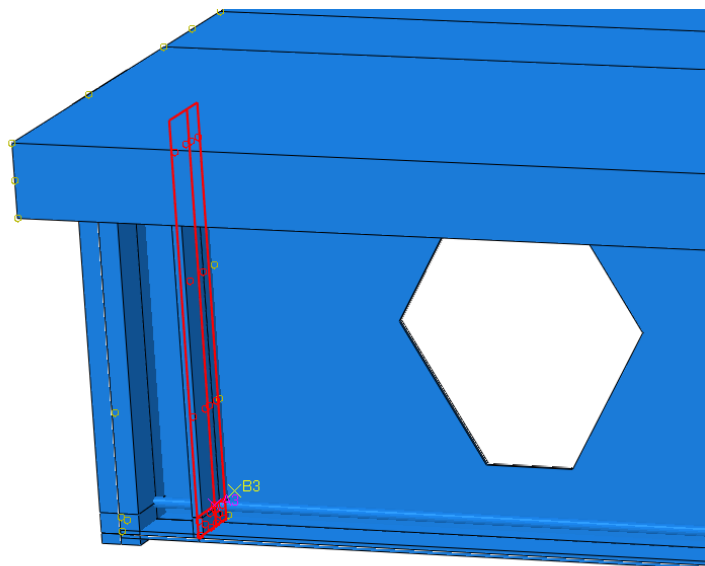


Figura 5.25 - Vinculação do desviador com o ponto de referência.

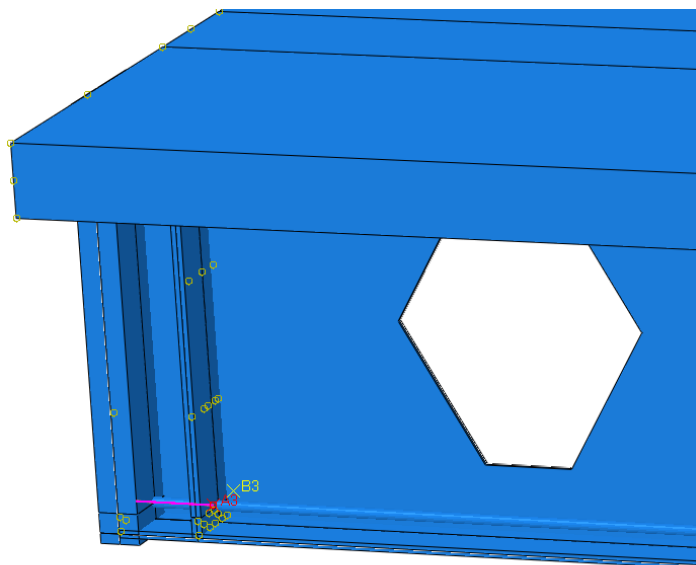


Figura 5.26 - Vinculação do ponto de referência com o cabo de protensão.

## 5.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foi criada uma “*Boundary Condition*” da categoria “*Mechanical*” do tipo “*Displacement*” com o movimento em todos os eixos livre, restringindo apenas a translação na direção do eixo x (U1) no Apoio 1 e translação na direção do eixo-x (U1) e eixo-y (U2) no Apoio 2. Essa condição de contorno simula uma viga biapoiada nas extremidades, como mostra a Figura 5.27.

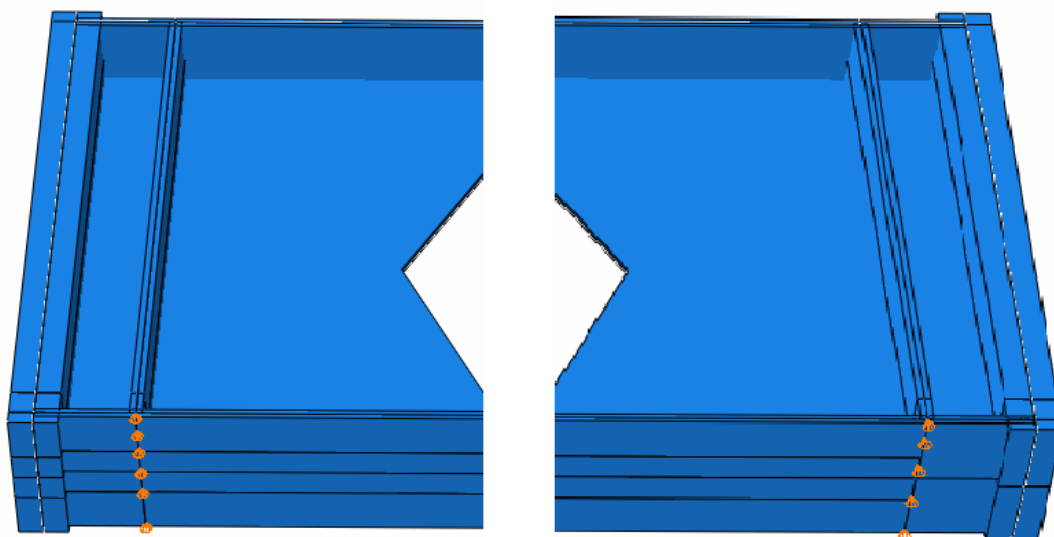


Figura 5.27 - Detalhe da vinculação de apoio na viga (biapoiada).

## 5.7 APLICAÇÃO DE CARGAS

O *software* ABAQUS solicita que as cargas aplicadas e as condições de contorno sejam separadas em etapas de acordo com o tipo de modelo. Neste trabalho específico, foram divididos em 3 etapas que serão descritas a seguir.

- Etapa inicial (*initial step*):

Durante a etapa inicial do modelo, foram inseridas as condições de contorno (apoios) e as vinculações (contatos e restrições) de movimento entre as peças modeladas.

- 1ª etapa (*step 1*):

Nesta etapa ocorre a aplicação do peso próprio da estrutura. Para cada uma das partes que constituem a seção mista foram atribuídas as suas respectivas densidades, dentro do módulo das propriedades (*property*) do *software*. Com a densidade dos materiais já informadas, foi somente necessário a imposição da ação gravitacional, através do módulo de força do programa (*load*).

- 2ª etapa (*step 2*):

Nesta etapa foram aplicadas as cargas externas à estrutura e a protensão nos cabos. No ensaio experimental, as cargas foram aplicadas pontualmente, no entanto, para o modelo numérico, ocorre uma concentração de tensões muito alta na região da aplicação. Logo, a carga foi aplicada de maneira distribuída numa pequena área na face superior da laje de concreto armado (Figura 5.28). Para isto foi criado um ponto de referência (*reference point*) para aplicação da carga, sendo este acoplado a área citada, transferindo os esforços, como mostra a Figura 5.29.

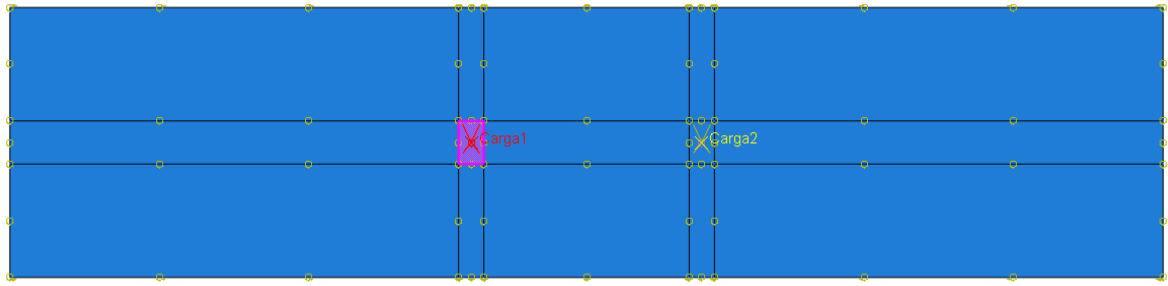


Figura 5.28 - Área de aplicação de cargas externas no modelo.

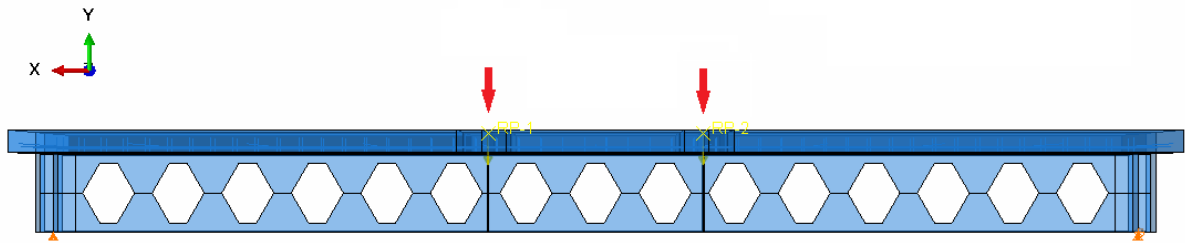


Figura 5.29 - Posição das cargas externas no modelo.

Além disso, a carga de protensão nos cabos foram adicionadas por meio de macacos hidráulicos nos experimentos de Ayyub et al. (1990), no entanto, no modelo computacional essa protensão foi inserida por meio de carga de temperatura inicial. Conforme Ren et al. (2015), a temperatura aplicada  $t$  (°C) pode ser obtida a partir da Eq. (5.11).

$$C = -\frac{P}{c \cdot E \cdot A} \quad (5.11)$$

Onde:  $C$  é o coeficiente de expansão linear, considerado como  $1,0 \times 10^{-5}$  (MPa/°C);  $E$  é o módulo de elasticidade do cabo de protensão, em MPa;  $A$  é a área da seção transversal do cabo de protensão, em mm²;  $P$  (em N) é a força de protensão calculada com base na força registrada durante o processo de pré-tensão, considerando também as perdas de protensão.

No ensaio experimental foi aplicada uma carga de 173,5 kN e o cabo tem 139,5 mm<sup>2</sup>, resultando em uma carga de temperatura de -621.86 °C aplicada de forma contante em toda a extensão dos cabos de protensão (Figura 5.30). No modelo, esta carga foi criada por meio do *Predefined Field* no módulo *Load* do *software* ABAQUS, escolhendo na categoria *Other* existe o tipo *Temperature*.

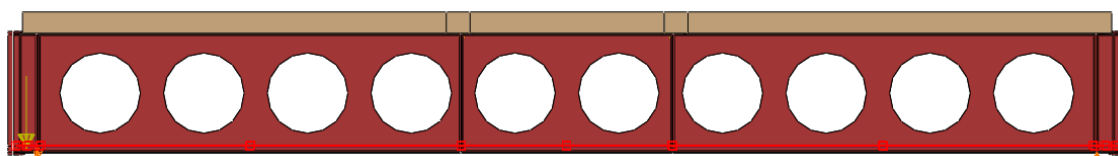


Figura 5.30 - Carga de temperatura inicial pelos cabos de protensão.

## 6 RESULTADOS NUMÉRICOS

As vigas modeladas foram feitas com e sem protensão, e alterando os formatos dos alvéolos para comparação das tensões e desempenho geral da viga. A Tabela 6.1 especifica a nomenclatura das vigas e o Anexo A descreve as características das vigas modeladas no trabalho.

Tabela 6.1 -Indicação das vigas modeladas.

Nomenclatura		Nomenclatura		Nomenclatura	
1	SP-Padrão	26	Prot-Ret3	51	Prot-Circ1-Desv3
2	SP-Circ1	27	Prot-Circ2-100%	52	Prot-Circ1-Desv4
3	SP-Circ2	28	Prot-Hex2-100%	53	Prot-Hex1-Desv1
4	SP-Circ3	29	Prot-Diam2-100%	54	Prot-Hex1-Desv2
5	SP-Hex1	30	Prot-Ret2-100%	55	Prot-Hex1-Desv3
6	SP-Hex2	31	Prot-Circ2-75%	56	Prot-Hex1-Desv4
7	SP-Hex3	32	Prot-Hex2-75%	57	Prot-Circ1-Desv1-2alv
8	SP-Diam1	33	Prot-Diam2-75%	58	Prot-Circ1-Desv1-Menor
9	SP-Diam2	34	Prot-Ret2-75%	59	Prot-Circ1-Desv1-X
10	SP-Diam3	35	Prot-Circ2-50%	60	Prot-Circ1-Desv1-Cabo
11	SP-Ret1	36	Prot-Hex2-50%	61	Prot-Hex1-Desv-2alv
12	SP-Ret2	37	Prot-Diam2-50%	62	Prot-Hex1-Desv-Menor
13	SP-Ret3	38	Prot-Ret2-50%	63	Prot-Hex1-Desv1-X
14	Prot-Padrão	39	Prot-Circ1-e120	64	Prot-Hex1-Desv1-Cabo
15	Prot-Circ1	40	Prot-Circ1-e150	65	Prot-Circ1-Desv12
16	Prot-Circ2	41	Prot-Circ1-e200	66	Prot-Circ1-Desv123
17	Prot-Circ3	42	Prot-Hex1-e120	67	Prot-Circ1-Desv123-Cabo
18	Prot-Hex1	43	Prot-Hex1-e150	68	Prot-Circ1-Desv123-X
19	Prot-Hex2	44	Prot-Hex1-e200	69	Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X
20	Prot-Hex3	45	Prot-Circ1-2alv	70	Prot-Hex1-Desv12
21	Prot-Diam1	46	Prot-Circ1-4alv	71	Prot-Hex1-Desv123
22	Prot-Diam2	47	Prot-Hex1-2alv	72	Prot-Hex1-Desv123-Cabo
23	Prot-Diam3	48	Prot-Hex1-4alv	73	Prot-Hex1-Desv123-X
24	Prot-Ret1	49	Prot-Circ1-Desv1	74	Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X
25	Prot-Ret2	50	Prot-Circ1-Desv2		



## 6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Este trabalho teve seu modelo numérico validado pelos dados experimentais de Ayyub et al. (1990) e pelo modelo numérico elaborado por Silva (2018). Em ambos os trabalhos, foram feitas vigas simplesmente apoiadas, mistas de aço-concreto, protendidas com cabos retos e duas cargas concentradas no topo da laje. Esses dados foram utilizado para a elaboração das vigas padrão, sem e com protensão.

A viga padrão sem protensão foi comparada diretamente com a viga modelada por Silva (2018). Todas as propriedades dos materiais, interações de contato, condições de contorno e aplicação de carga foram mantidas iguais para validação do modelo. As propriedades geométricas da viga padrão estão ilustradas na Figura 6.1.

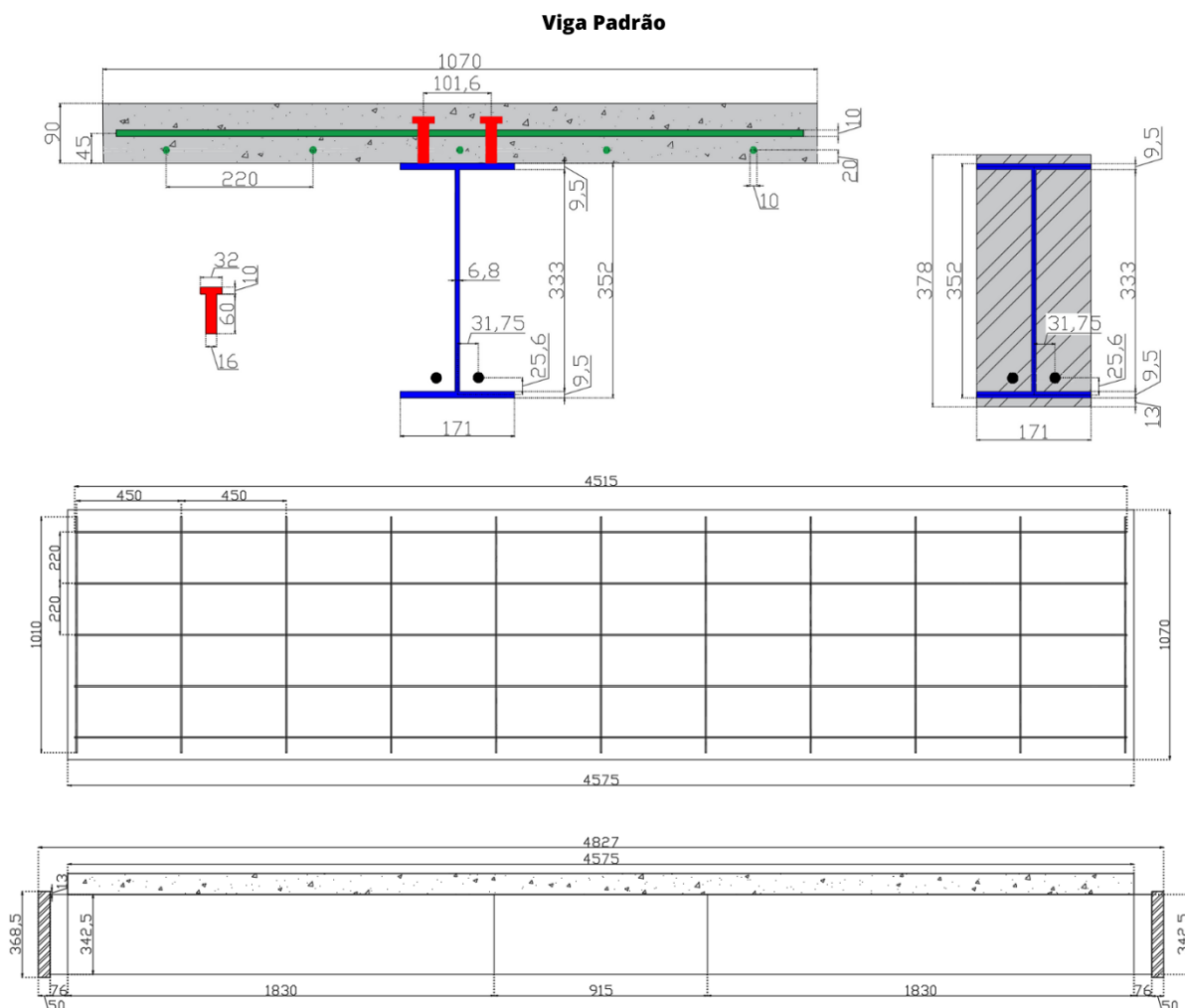


Figura 6.1 - Perfil tipo Padrão.

Considerando a curva "carga vs. deslocamentos" da viga composta de Silva (2018) e da viga padrão estudada nesta pesquisa, observa-se uma boa concordância, como mostra a Figura 6.2. Nessa figura, para deslocamentos de 30 mm e 50 mm e com os conectores de cisalhamento modelados, na viga de Silva, as cargas aplicadas são, respectivamente, 530 kN e 570 kN. Enquanto isso, para a viga padrão desta pesquisa, para esses deslocamentos, as cargas aplicadas são, respectivamente, 530 kN e 560 kN, aproximadamente. Portanto, a viga padrão deste trabalho é, em média, 3% mais rígida do que a viga elaborada por Silva.

Essa disparidade ocorre principalmente porque Silva modelou sua viga de forma simétrica (apenas metade da viga foi modelada), aproveitando o efeito de simetria, ao contrário do modelo da tese, que foi modelado de maneira completa. Isso resultou em um aumento na rigidez do perfil da viga.

Além disso, foi feita uma comparação com outro tipo de conexão entre as vigas compostas. Em vez de modelar os conectores de cisalhamento, o efeito de amarração também foi simulado, ligando diretamente a laje de concreto armado ao perfil I de aço, ou seja, o efeito *TIE*. Os resultados foram muito semelhantes (Figura 6.2) e não houve aumento significativo no esforço computacional para modelar os conectores, por isso foi decidido modelar todas as vigas com conectores de cisalhamento.

Para a conexão tipo *TIE*, para deslocamentos de 30 mm e 50 mm na viga de Silva, as cargas aplicadas são, respectivamente, 555 kN e 590 kN, e para a viga desta pesquisa são, respectivamente, 530 kN e 550 kN, sendo assim uma diferença de 5% em média.

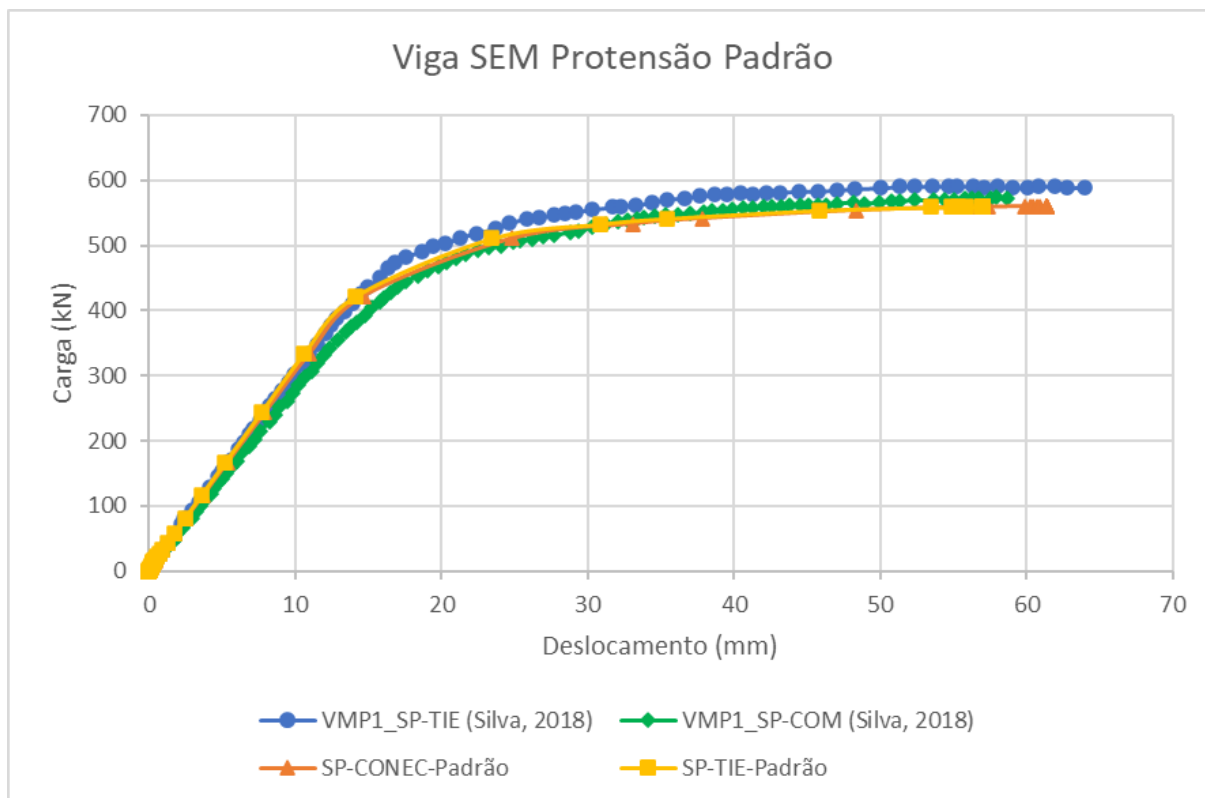


Figura 6.2 - Curva carga x deslocamento das vigas sem alvéolos e sem protensão.

Ainda, a qualidade das curvas obtidas entre a viga de Silva (2018) e a viga padrão deste trabalho, em termos de comportamento não linear, também mostra uma boa concordância. Portanto, considerando as diferenças entre as duas vigas, pode-se concluir que a simulação numérica usando o ABAQUS pode ser aplicada a outras vigas com alvéolos.

Em seguida, foi feita a aplicação dos cabos de protensão ao modelo, e esse resultado foi comparado aos de Ayyub et al. (1990) e Silva (2018).

Na Figura 6.3, pode-se observar a curva carga x deslocamento dos modelos com protensão. Para deslocamentos de 30 mm e 50 mm, na viga de Silva, as cargas aplicadas são, respectivamente, 670 kN e 720 kN. Enquanto isso, para a viga padrão desta pesquisa, para esses deslocamentos, as cargas aplicadas são, respectivamente, 670 kN e 720 kN. E para o ensaio experimental de Ayyub, as cargas são, respectivamente, 720 kN e 760 kN. Portanto, a viga padrão deste trabalho apresenta mesmo desempenho da viga modelada por Silva e, em média, 6% mais rígida do que a viga experimental de Ayyub et al. (1990).

Essa diferença pode ser justificada pois no *software* ABAQUS, a interação entre o aço e o concreto é geralmente modelada por elementos de interface com comportamento idealizado.

No experimento de Ayyub et al. (1990), podem ter ocorrido deslizamentos e falhas parciais nos conectores de cisalhamento, reduzindo a rigidez total. Ainda, a simulação utiliza uma malha de elementos finitos refinada e simétrica, garantindo distribuição uniforme de tensões. No experimento, podem ter ocorrido concentrações de tensões localizadas devido a pequenos desvios geométricos, que não são capturadas pela modelagem numérica.

Esses fatores, combinados, justificam a maior rigidez média observada na viga modelada numericamente, que apresenta condições ideais de comportamento estrutural. Esse tipo de variação é comum em comparações entre resultados experimentais e modelos numéricos devido às simplificações e idealizações adotadas na simulação computacional.

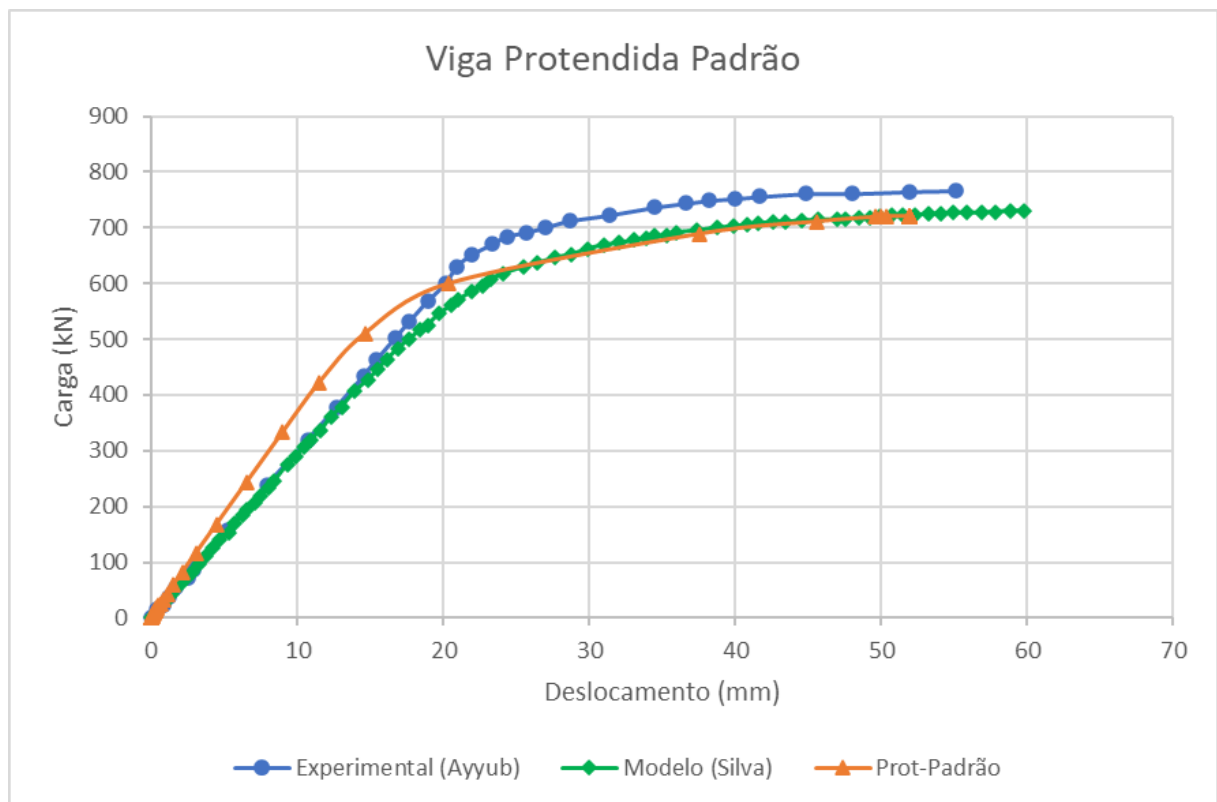


Figura 6.3 - Curva carga x deslocamento das vigas sem alvéolos e com protensão.

## 6.2 VIGAS MISTAS ALVEOLADAS SEM PROTENSÃO

Nesta etapa, foram modeladas as vigas 1 a 13, todas sem protensão, as dimensões específicas desses perfis estão detalhadas nas Figura 6.4 a Figura 6.7.

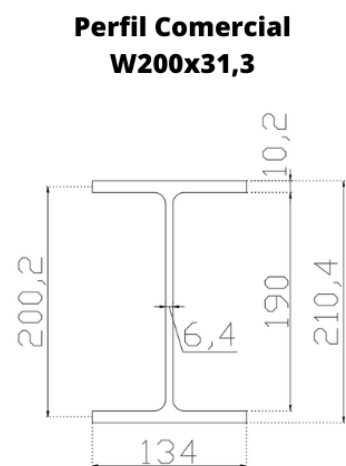
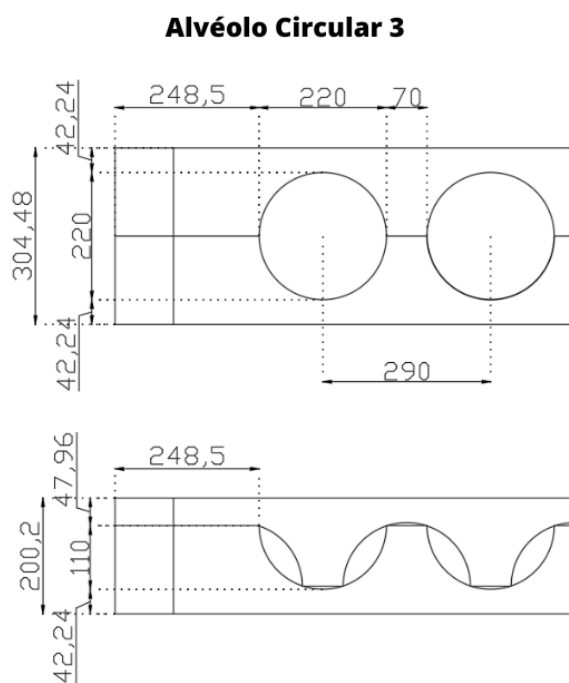
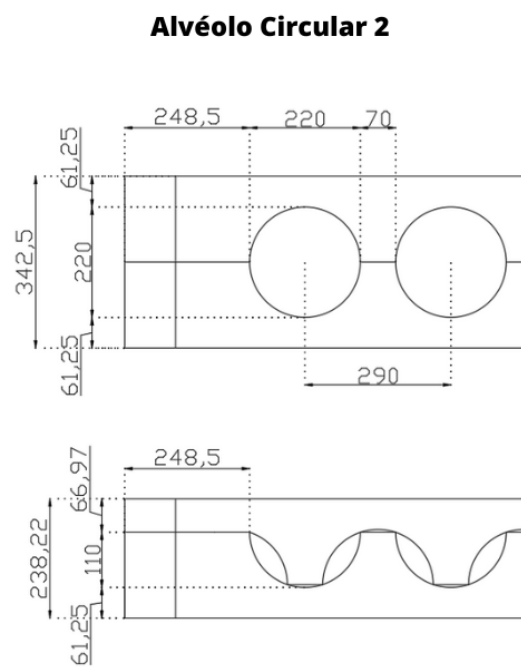
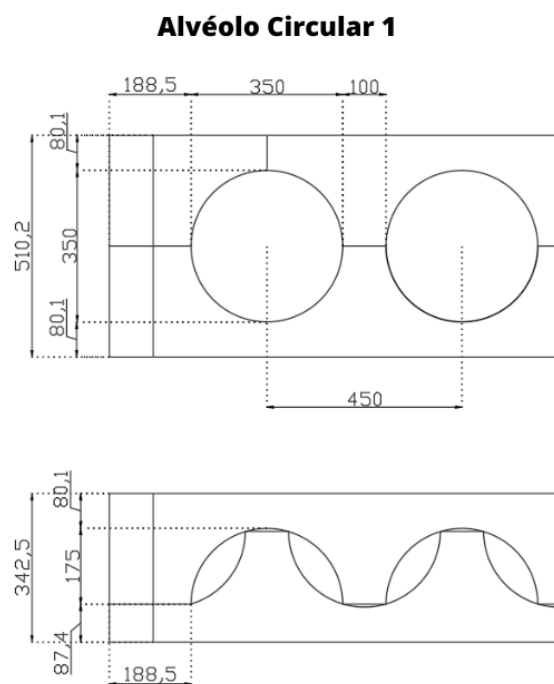


Figura 6.4 - Perfis com alvéolos Circulares.

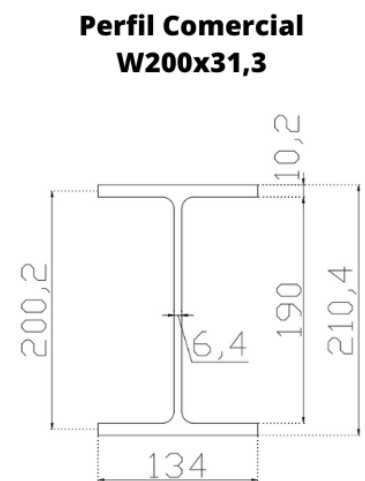
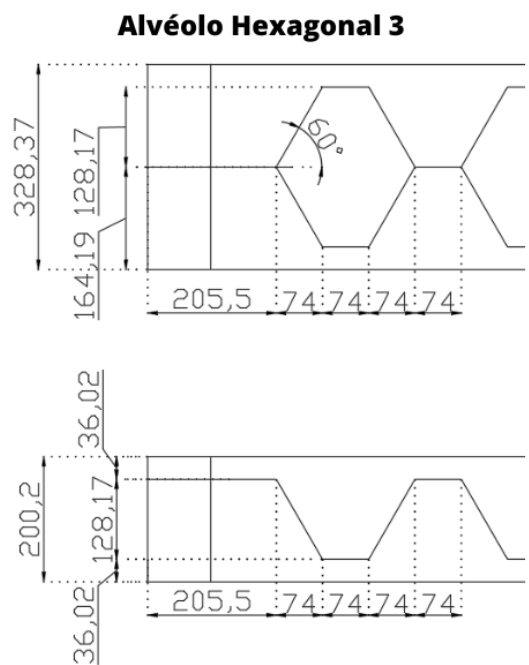
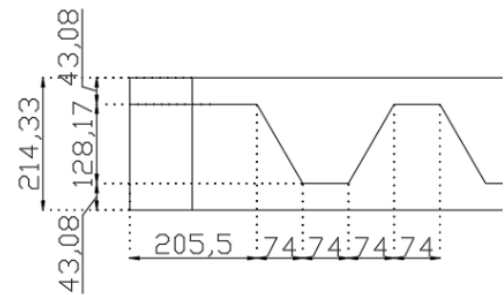
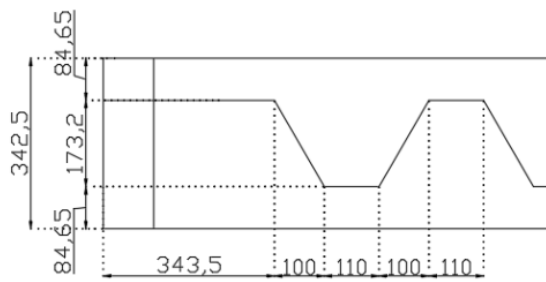
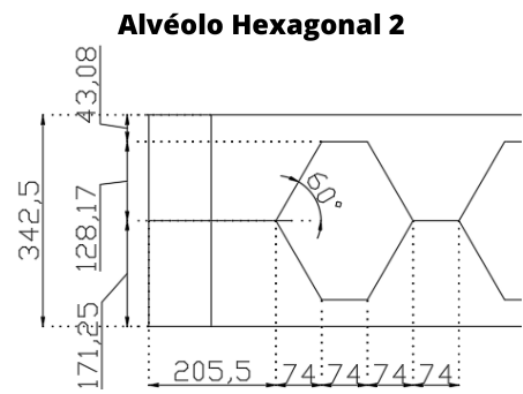
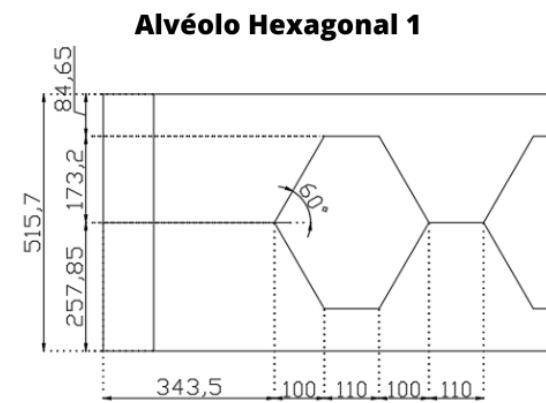


Figura 6.5 - Perfis com alvéolos Hexagonais.

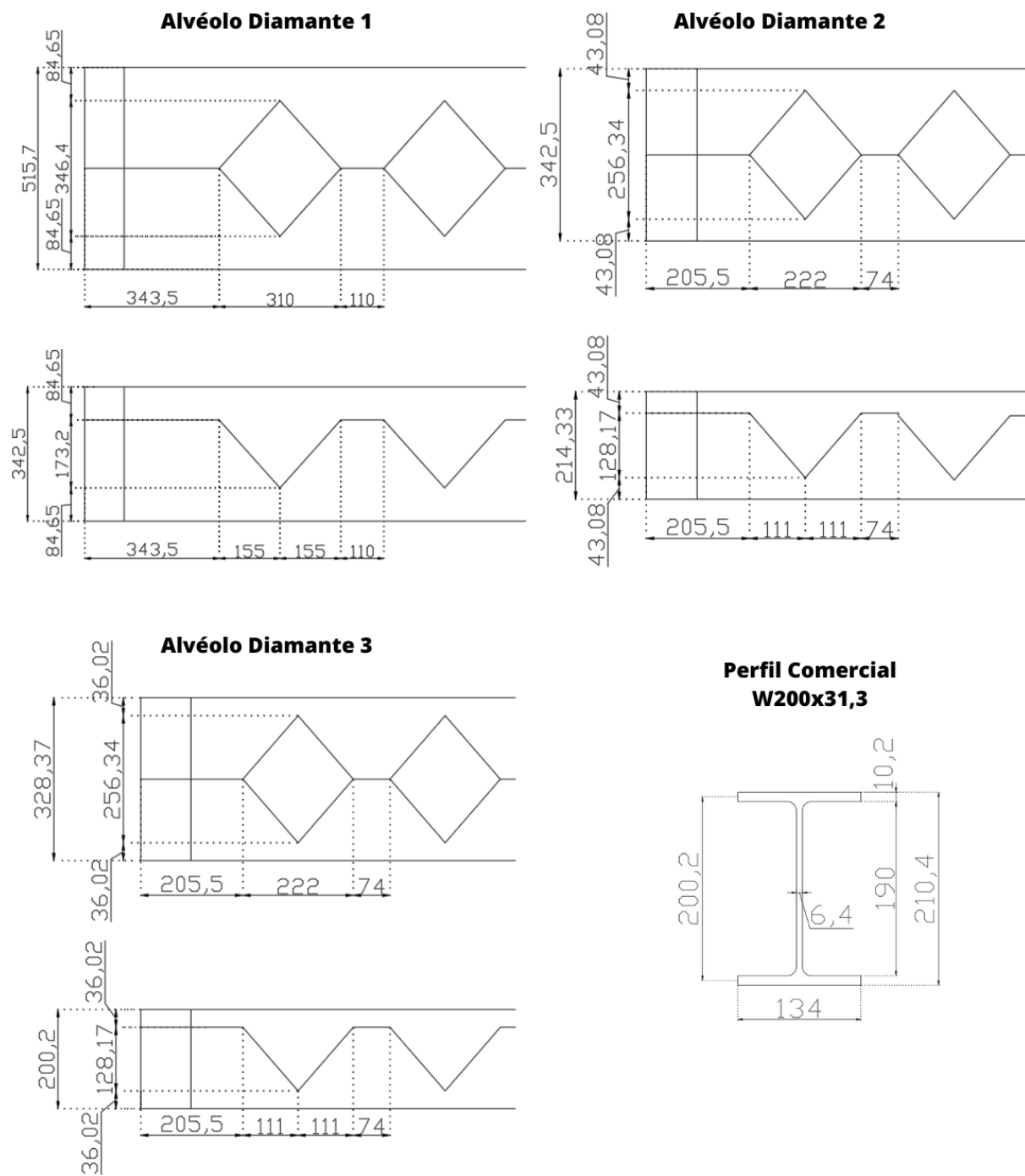


Figura 6.6 - Perfis com alvéolos Diamantes.

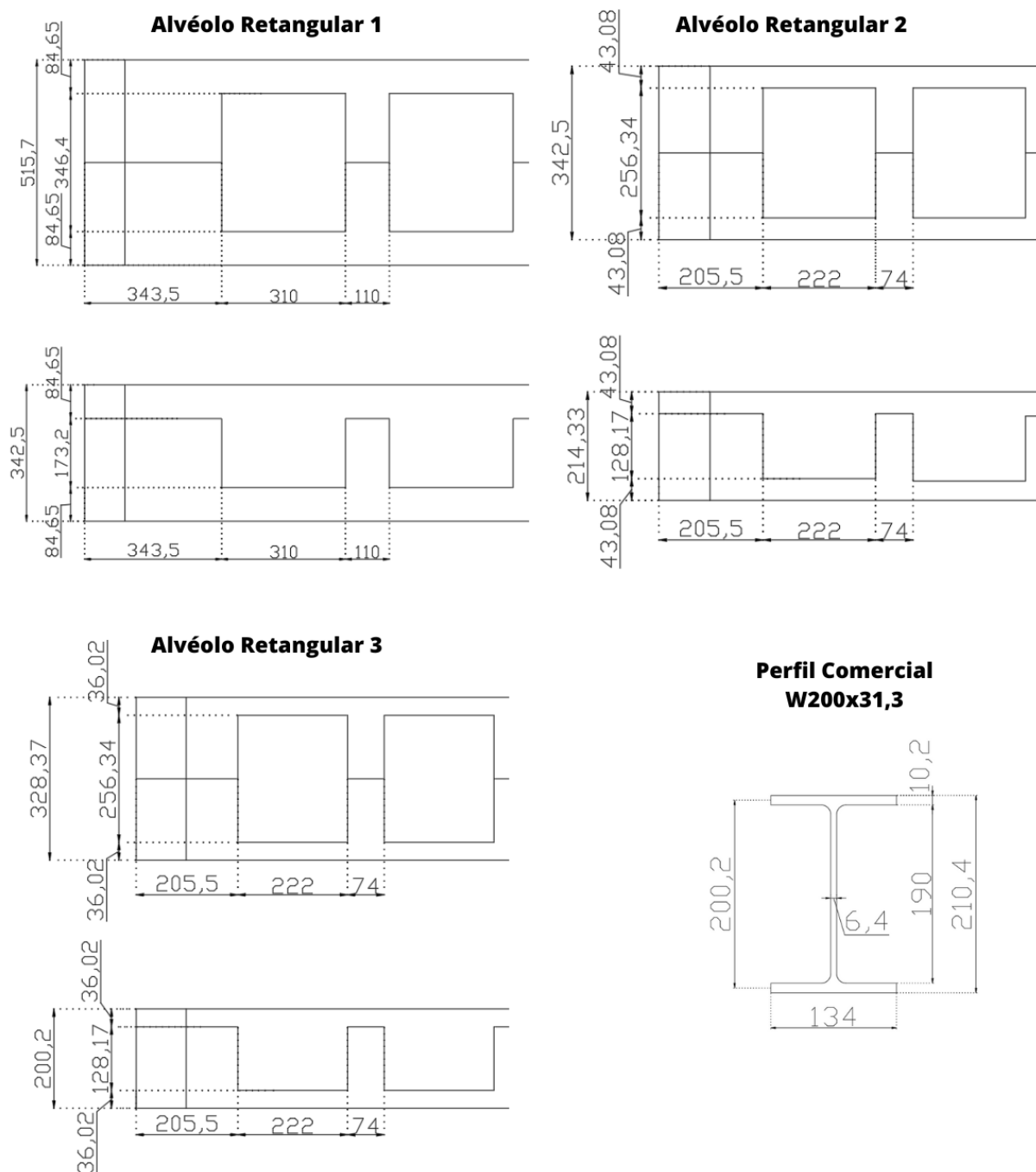


Figura 6.7 - Perfis com alvéolos Retangulares.

Após a validação do modelo numérico inicial, foram inseridos alvéolos nas vigas mistas, buscando avaliar o impacto dessas aberturas no comportamento estrutural. A inclusão dos alvéolos visa simular perfis utilizados em aplicações práticas, considerando diferentes configurações geométricas e suas influências na resistência e estabilidade global.



Este capítulo apresenta os resultados obtidos para as vigas mistas alveoladas sem protensão, destacando parâmetros como capacidade de carga, deformações e modos de falha observados nas simulações realizadas.

### 6.2.1 Alvéolos Circulares

O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi aplicado à modelagem das vigas com diferentes tipos de furos circulares (tipos 1, 2 e 3), para avaliar a influência dos alvéolos nas vigas mistas de aço-concreto. Uma comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.8.

A Tabela 6.2 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas com alvéolos circulares sem protensão, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.3 exibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço com alvéolos circulares e sem protensão.

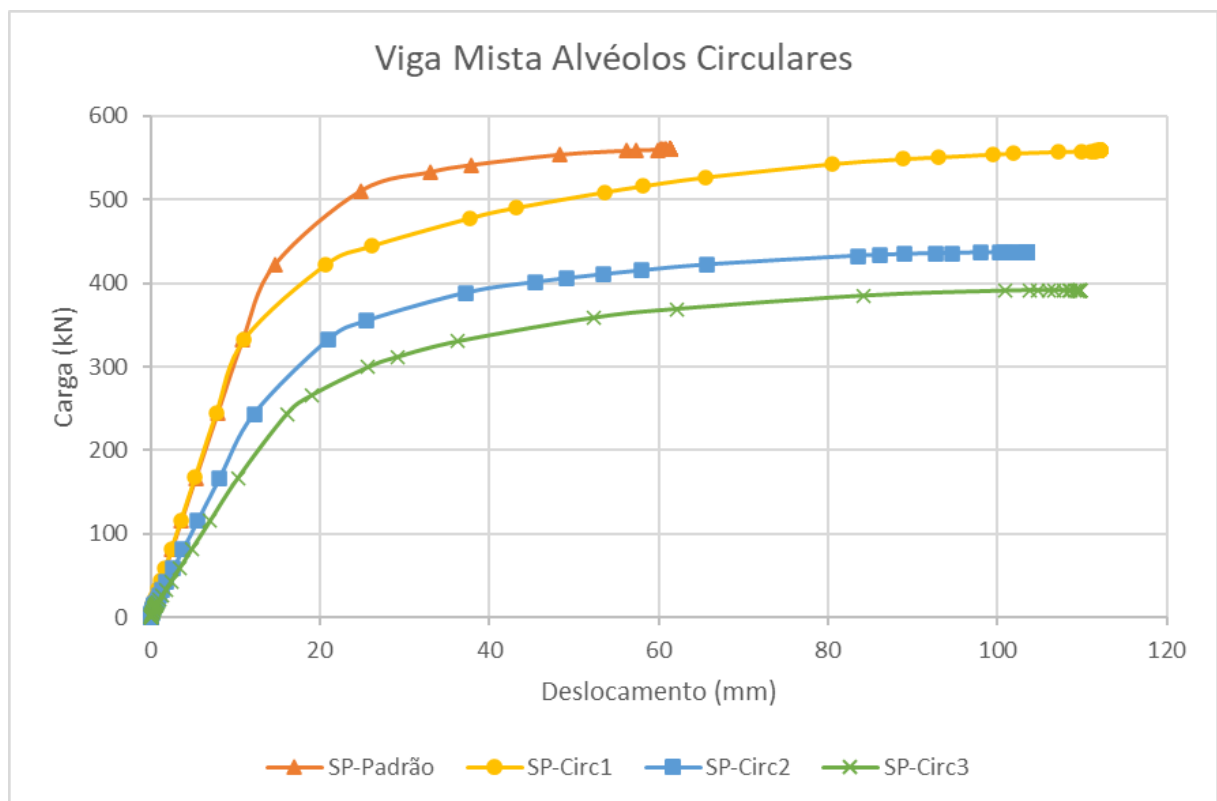


Figura 6.8 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos circulares sem protensão.

Tabela 6.2 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos circulares sem protensão.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
1	SP-Padrão	61,40	-	560,02	-
2	SP-Circ1	112,19	+82,7%	558,38	-0,3%
3	SP-Circ2	103,45	+68,5%	436,91	-22,0%
4	SP-Circ3	109,78	+78,8%	391,67	-30,1%

Tabela 6.3 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos circulares.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
1	SP-Padrão	221,75	-	352	-
2	SP-Circ1	221,04	-0,3%	519,7	+47,6%
3	SP-Circ2	191,11	-13,8%	352	0,0%
4	SP-Circ3	154,47	-30,3%	314,68	-10,6%

Conforme apresentado na Tabela 6.2, a inserção de alvéolos circulares impacta significativamente o comportamento estrutural das vigas. A viga SP-Circ1 apresentou um aumento de 82,7% no deslocamento máximo em comparação à viga SP-Padrão, com uma redução mínima na carga máxima (-0,3%). Isso sugere uma redução na rigidez sem impacto substancial na resistência à carga.

Já a viga SP-Circ2 apresentou uma queda de 22% na carga máxima suportada e um aumento de 68,5% no deslocamento máximo. Esse comportamento indica uma perda de rigidez significativa associada à menor seção transversal efetiva devido há redução da altura total do perfil.

A viga SP-Circ3 apresentou o pior desempenho, com uma redução de 30,1% na carga máxima e um aumento de 78,8% no deslocamento máximo, evidenciando que o excesso de aberturas compromete fortemente a resistência estrutural.

Na Tabela 6.3, pode-se observar que a inclusão de alvéolos resultou em perfis mais leves e, em alguns casos, mais altos, visando compensar a perda de rigidez. A viga SP-Circ1 manteve praticamente o peso da viga padrão (-0,3%), mas com um aumento expressivo de 147,6% na altura total, indicando que a geometria foi ajustada para manter a capacidade de carga.

A viga SP-Circ2 apresentou uma redução de 13,8% no peso, mantendo a altura da viga padrão. No entanto, sua carga máxima suportada foi substancialmente menor, indicando que a perda de massa afetou negativamente a resistência.

A viga SP-Circ3 apresentou a maior redução de peso (69,7%) e uma altura 10,6% menor que a viga padrão, resultando em um desempenho estrutural consideravelmente inferior devido à significativa diminuição da área efetiva e da rigidez, já que o perfil comercial tem dimensões menores que o perfil padrão.

Esses resultados destacam a importância de equilibrar a geometria dos alvéolos e a altura final da viga para manter a eficiência estrutural, especialmente em projetos que exigem leveza e alta capacidade de carga.

As Figuras 6.9, 6.10, e 6.11 juntamente com as Tabelas 6.4, 6.5, e 6.6 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A análise das tensões de Von Mises fornece uma visão geral da distribuição de tensões equivalentes em uma estrutura e é crucial para avaliar a probabilidade de falha do material devido a tensões combinadas. Os resultados apresentados na Tabela 6.4 indicam as seguintes observações:

Analisando as tensões máximas de Von Mises nas vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão revela um aumento moderado nas tensões devido à presença das aberturas. A viga SP-Circ1 apresentou o maior aumento, com uma elevação de 14% em relação à viga padrão (SP-Padrão), evidenciando que a introdução de alvéolos e o aumento na altura da seção resultaram em uma redistribuição mais intensa das tensões ao redor das aberturas.

As vigas SP-Circ2 e SP-Circ3 apresentaram aumentos menores nas tensões máximas, de 6% e 7%, respectivamente. Isso indica que, apesar das mudanças geométricas e reduções de peso, as tensões máximas permaneceram relativamente controladas. Esses resultados sugerem que,

embora a inserção de alvéolos comprometa a rigidez global, o aumento das tensões foi moderado, mostrando que a configuração geométrica adotada foi eficiente para evitar concentrações de tensões excessivas nas regiões críticas.

A análise das tensões longitudinais (S11) nas vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão, apresentados na Tabela 6.5, mostra aumentos moderados em relação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Circ1 apresentou uma elevação de 5% na tensão longitudinal, sugerindo que o aumento na altura do perfil contribuiu para a redistribuição dos esforços ao longo da seção, embora as aberturas tenham intensificado as tensões em algumas regiões críticas.

As vigas SP-Circ2 e SP-Circ3 também apresentaram aumentos de 4% e 5%, respectivamente, indicando um comportamento estrutural semelhante, apesar das diferenças na geometria e no peso dessas vigas. Esses resultados refletem que a configuração dos alvéolos, mesmo com uma redução significativa de material em alguns casos, não comprometeu severamente a resistência longitudinal, mantendo o desempenho estrutural próximo ao modelo padrão. Isso sugere que o dimensionamento adequado das aberturas pode resultar em perfis mais leves, sem grandes perdas na capacidade de resistir aos esforços longitudinais.

A análise das tensões cisalhantes (S12) nas vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão, apresentadas na Tabela 6.6, evidencia um aumento expressivo nas tensões devido à presença das aberturas. A viga SP-Circ1 apresentou o maior valor, com um aumento de 60% em relação à viga padrão (SP-Padrão). Esse aumento significativo ocorre porque a introdução de alvéolos provoca descontinuidades na alma da viga, concentrando as tensões ao redor das bordas das aberturas.

As vigas SP-Circ2 e SP-Circ3 também registraram aumentos consideráveis nas tensões cisalhantes, com acréscimos de 45% e 47%, respectivamente. Embora esses valores sejam ligeiramente inferiores ao da viga SP-Circ1, eles ainda indicam uma redistribuição crítica das tensões devido à redução da seção transversal efetiva causada pelos alvéolos. O comportamento similar das vigas SP-Circ2 e SP-Circ3 sugere que, mesmo com diferenças em altura e peso, ambas apresentaram níveis semelhantes de concentração de tensões cisalhantes, reforçando a necessidade de um dimensionamento adequado das aberturas para minimizar esses efeitos.

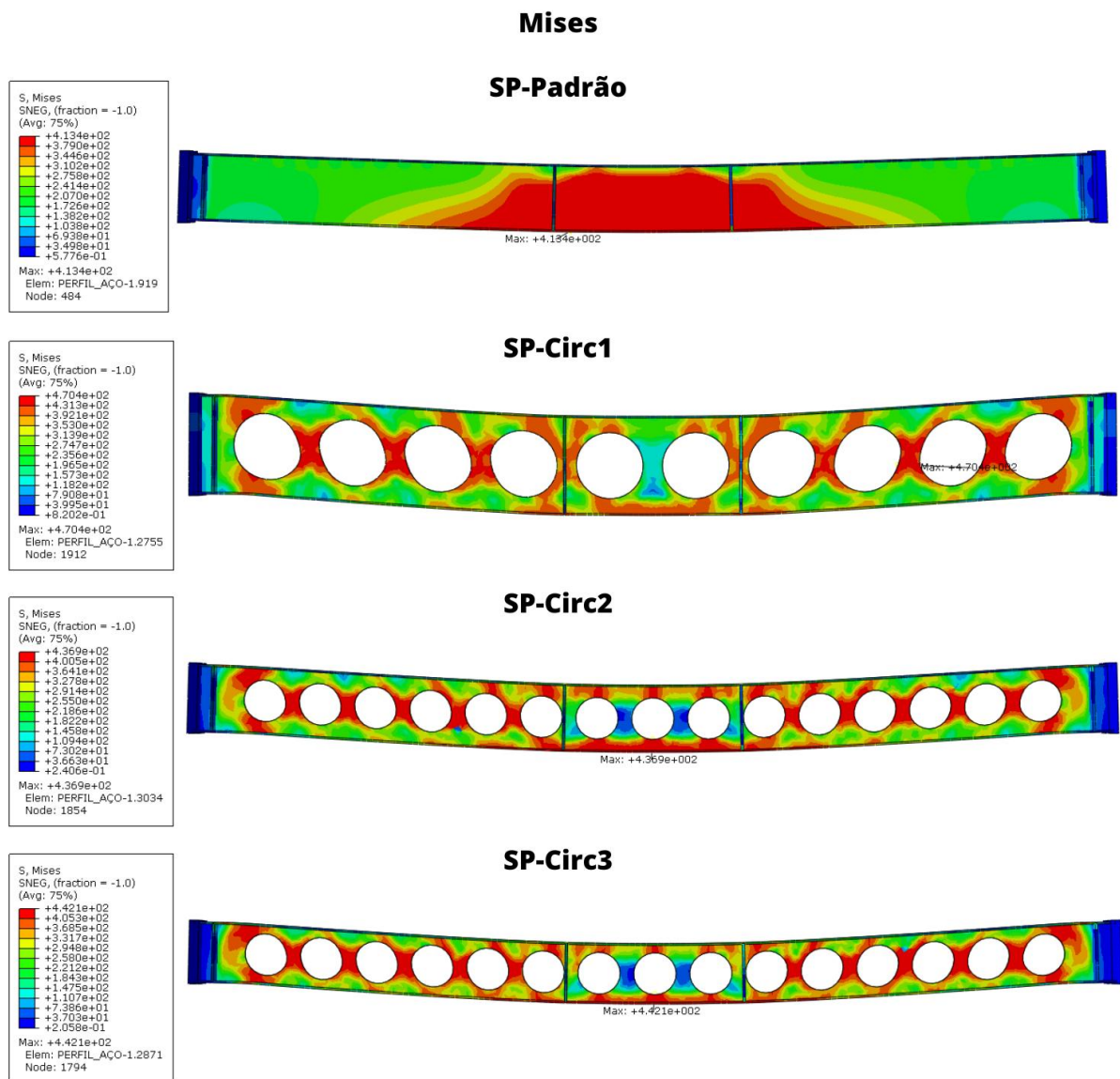


Figura 6.9 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

Tabela 6.4 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	413,4	-
2	SP-Circ1	470,4	+14%
3	SP-Circ2	436,9	+6%
4	SP-Circ3	442,1	+7%

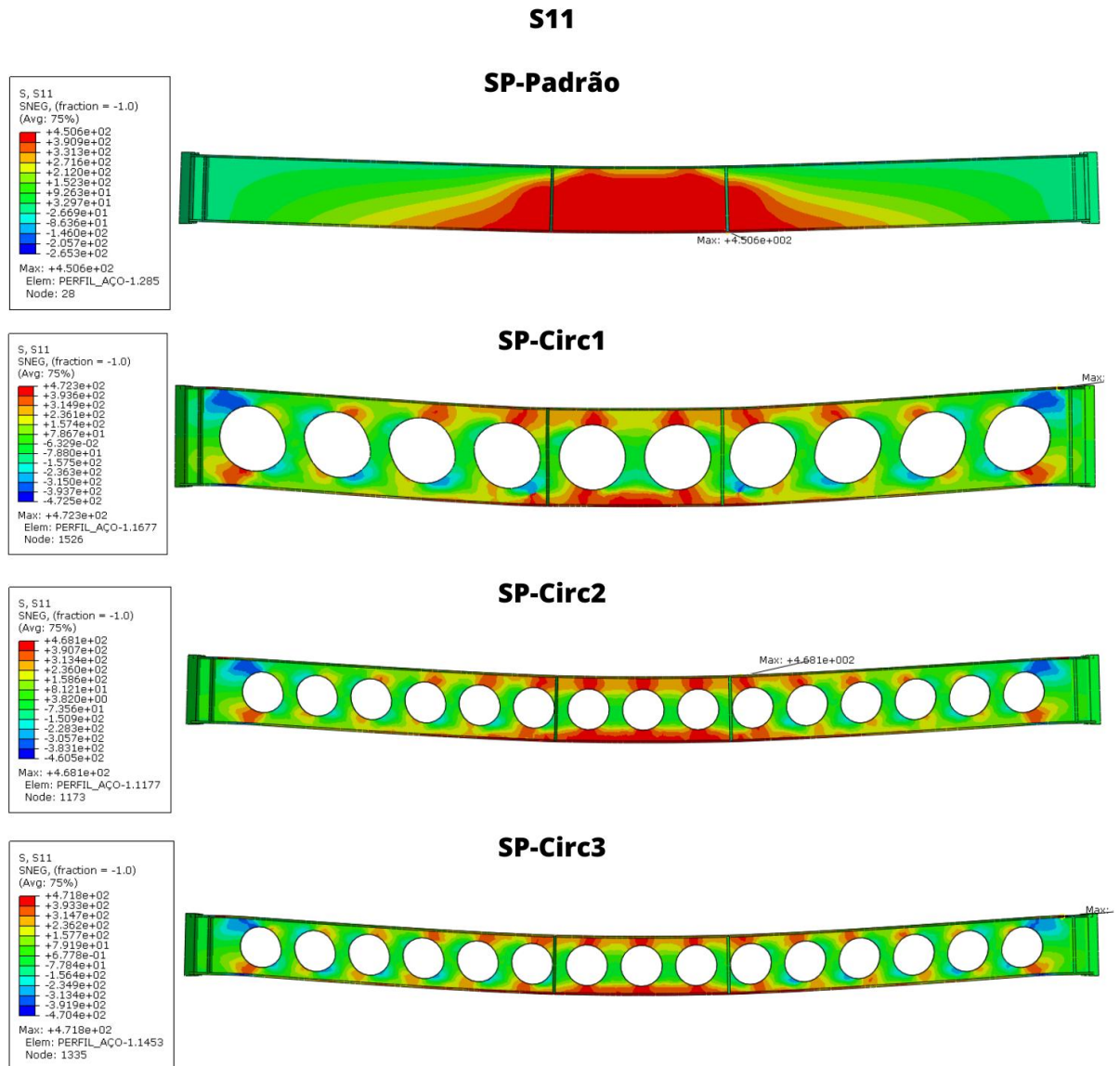


Figura 6.10 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

Tabela 6.5 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	450,6	-
2	SP-Circ1	472,3	+5%
3	SP-Circ2	468,1	+4%
4	SP-Circ3	471,8	+5%

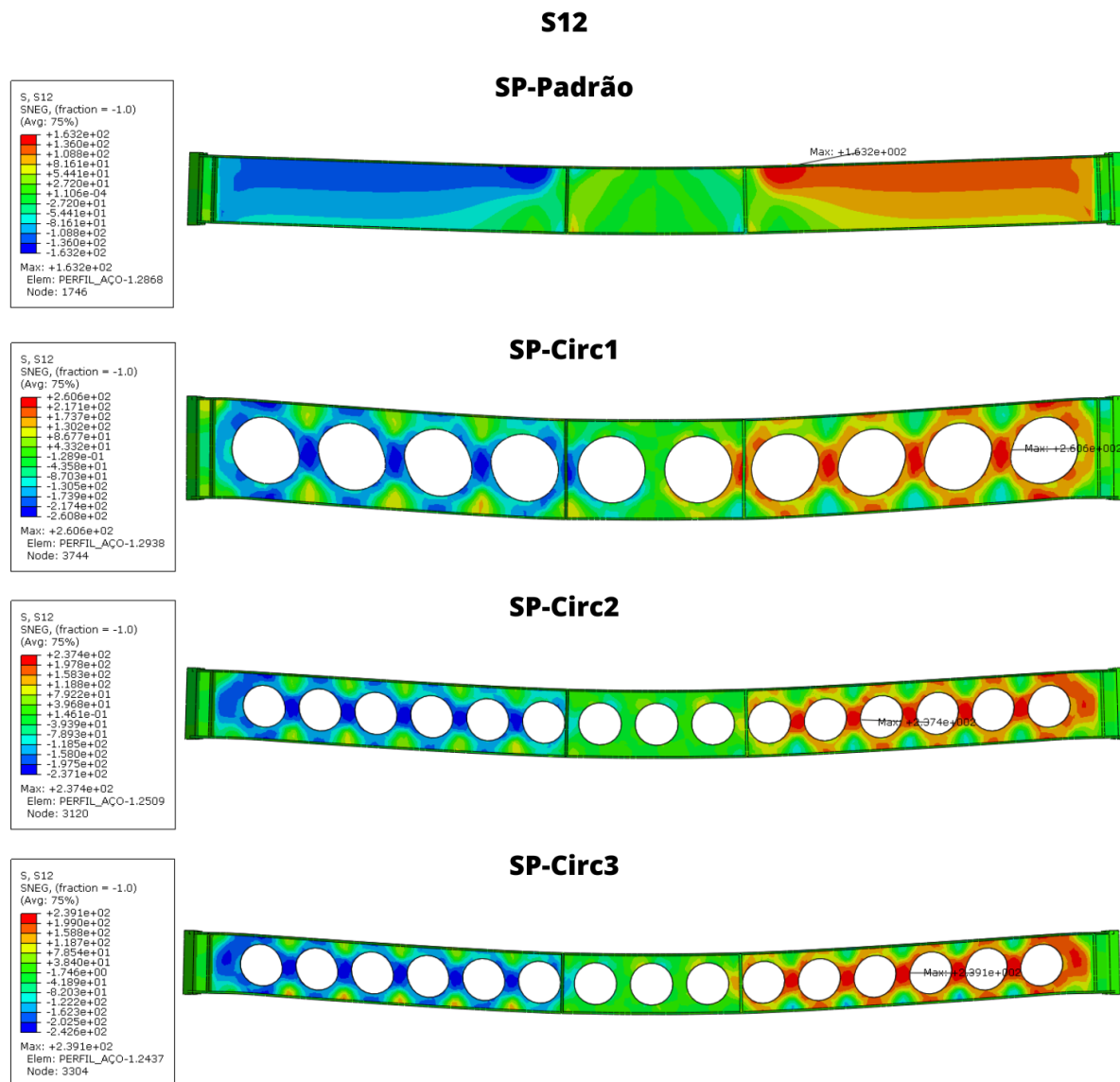


Figura 6.11 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

Tabela 6.6 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos circulares sem protensão.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	163,2	-
2	SP-Circ1	260,6	+60%
3	SP-Circ2	237,4	+45%
4	SP-Circ3	239,1	+47%

### 6.2.2 Alvéolos Hexagonais

Inserindo os alvéolos de com formatos hexagonais, uma comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.12.

A Tabela 6.7 mostra os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas com alvéolos hexagonais sem protensão, comparando esses valores com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.8 apresenta os pesos e as alturas finais dos perfis de aço com alvéolos hexagonais, também sem protensão.

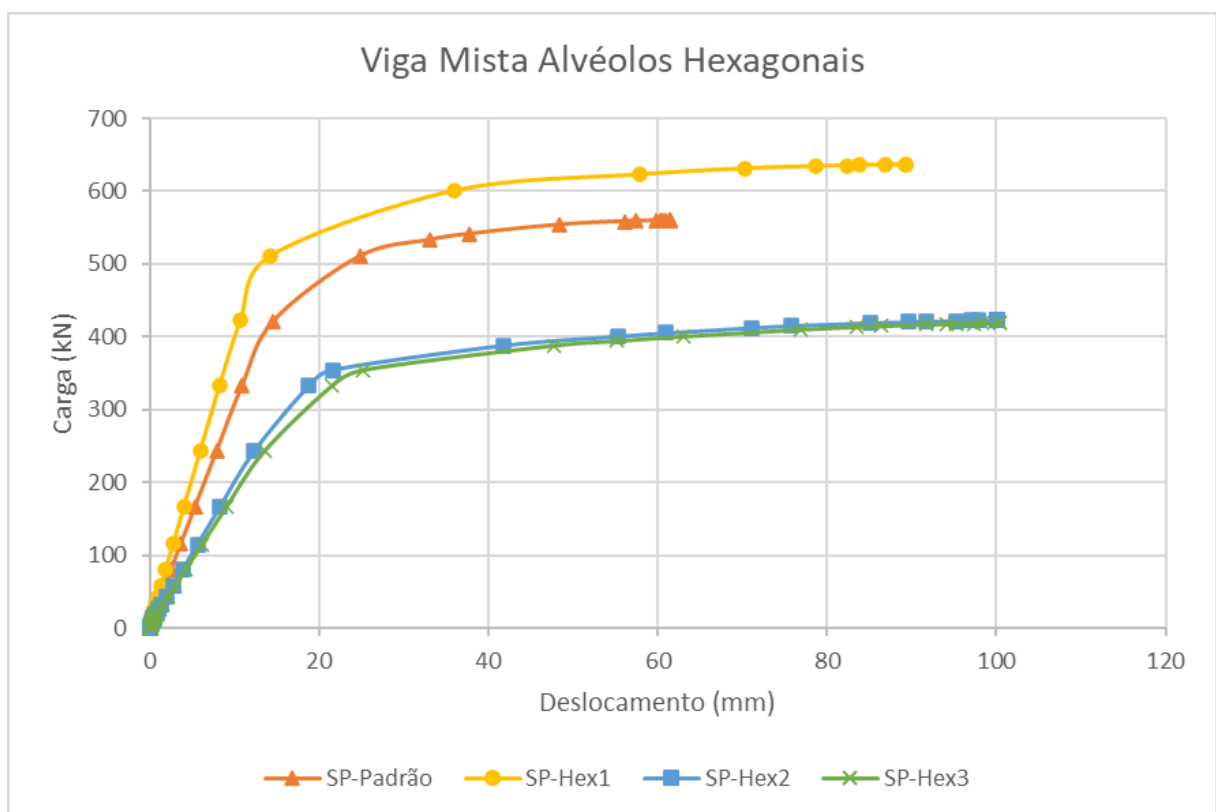


Figura 6.12 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos hexagonais sem protensão.



Tabela 6.7 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos hexagonais sem protensão.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
1	SP-Padrão	61,40	-	560,02	-
5	SP-Hex1	89,36	+46%	636,59	+14%
6	SP-Hex2	100,08	+63%	422,62	-25%
7	SP-Hex3	100,40	+64%	418,83	-25%

Tabela 6.8 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos hexagonais.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
1	SP-Padrão	221,75	-	352	-
5	SP-Hex1	233,57	+5%	525,2	+49%
6	SP-Hex2	191,17	-14%	352	0,0%
7	SP-Hex3	152,73	-31%	338,57	-4%

A análise dos resultados apresentados na Tabela 6.7 revela os efeitos estruturais causados pela introdução de alvéolos hexagonais nas vigas mistas sem protensão. A viga SP-Hex1 apresentou um aumento de 46% no deslocamento máximo em relação à viga padrão (SP-Padrão), porém, registrou um aumento de 14% na carga máxima suportada. Esse desempenho indica que a maior altura e a configuração dos alvéolos hexagonais proporcionaram uma maior capacidade de carga, ainda que acompanhada de uma perda de rigidez moderada.

Por outro lado, as vigas SP-Hex2 e SP-Hex3 mostraram um comportamento semelhante, com aumentos de deslocamento próximos a 63% e 64%, respectivamente. Ambas apresentaram uma queda significativa de 25% na carga máxima suportada. Esse resultado sugere que a configuração geométrica adotada nas duas vigas comprometeu a resistência estrutural, devido à maior perda de material nas regiões críticas da alma.

A Tabela 6.8 revela o impacto da introdução de alvéolos hexagonais nas características geométricas e no peso das vigas mistas sem protensão. As mudanças nas dimensões e no peso

dos perfis refletem diretamente a estratégia de projeto adotada para compensar a perda de material causada pelas aberturas.

A viga SP-Hex1 apresentou um aumento de 5% no peso e 49% na altura total em comparação com a viga padrão (SP-Padrão). Isso indica uma abordagem de compensação estrutural eficaz, onde a altura aumentada ajudou a melhorar a capacidade de carga, como visto na Tabela 6.7. Esse aumento de peso moderado sugere que o material foi redistribuído estrategicamente para reforçar as regiões críticas ao redor das aberturas.

As vigas SP-Hex2 e SP-Hex3 apresentaram reduções de 14% e 31% no peso, respectivamente. A viga SP-Hex2 manteve a altura da viga padrão, enquanto a SP-Hex3 apresentou uma redução de 4% na altura. Essa configuração comprometeu o desempenho estrutural, como evidenciado pela significativa perda de capacidade de carga observada anteriormente. A menor altura e o peso reduzido indicam uma menor resistência estrutural devido à diminuição da área efetiva da seção transversal por meio do perfil comercial que tem menores dimensões que o perfil padrão.

As Figura 6.13, 6.14, e 6.15 juntamente com as Tabela 6.9, 6.10, e 6.11 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente

A análise dos resultados da Tabela 6.9 mostra um aumento moderado nas tensões máximas de Von Mises nas vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Hex1 apresentou o maior aumento, com 10% a mais, indicando que, apesar de sua maior altura ter compensado parcialmente a introdução de alvéolos, as tensões ainda se concentraram nas regiões ao redor das aberturas.

As vigas SP-Hex2 e SP-Hex3 apresentaram aumentos de 9% e 7%, respectivamente. Esses valores relativamente menores podem ser explicados pela menor altura e pela perda de material, o que resultou em uma redistribuição de tensões menos intensa, mas ainda significativa. Esses resultados destacam que a presença de alvéolos hexagonais impacta a resistência à flexão das vigas, mas o aumento da altura e o correto dimensionamento podem mitigar esses efeitos.

A análise dos resultados da Tabela 6.10 revela aumentos moderados nas tensões longitudinais (S11) nas vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Hex1 apresentou um aumento de 4%, indicando que, embora sua altura

tenha sido significativamente ampliada, a redistribuição de esforços ainda resultou em um leve aumento nas tensões longitudinais devido à presença das aberturas.

As vigas SP-Hex2 e SP-Hex3 apresentaram aumentos semelhantes, de 5%, apesar de suas seções mais leves e alturas menores. Esse comportamento sugere que, mesmo com a perda de material ao redor das aberturas, as tensões longitudinais permaneceram controladas, possivelmente devido à configuração eficiente das aberturas e à redistribuição das forças ao longo da viga. Esses resultados evidenciam que o uso de alvéolos hexagonais impacta as tensões longitudinais de forma moderada, podendo ser compensado com ajustes na altura e na geometria do perfil.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 6.11 evidencia um aumento significativo nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Hex1 apresentou o maior valor, com um aumento de 47%, indicando que a introdução de alvéolos, mesmo com uma altura maior, resultou em concentrações de tensões nas regiões ao redor das aberturas.

As vigas SP-Hex2 e SP-Hex3 também apresentaram aumentos expressivos, de 43% e 45%, respectivamente. Esses resultados refletem a perda de continuidade na alma causada pelas aberturas hexagonais, o que intensifica as tensões cisalhantes nas extremidades das aberturas e nas transições entre as seções. A pequena diferença nos valores entre essas vigas sugere que a configuração geométrica similar resultou em um comportamento estrutural próximo.

Em resumo, as tensões cisalhantes aumentaram consideravelmente devido à presença das aberturas hexagonais, destacando a necessidade de reforços nas bordas dos alvéolos ou ajustes nas dimensões para mitigar esses efeitos e melhorar o desempenho global das vigas.

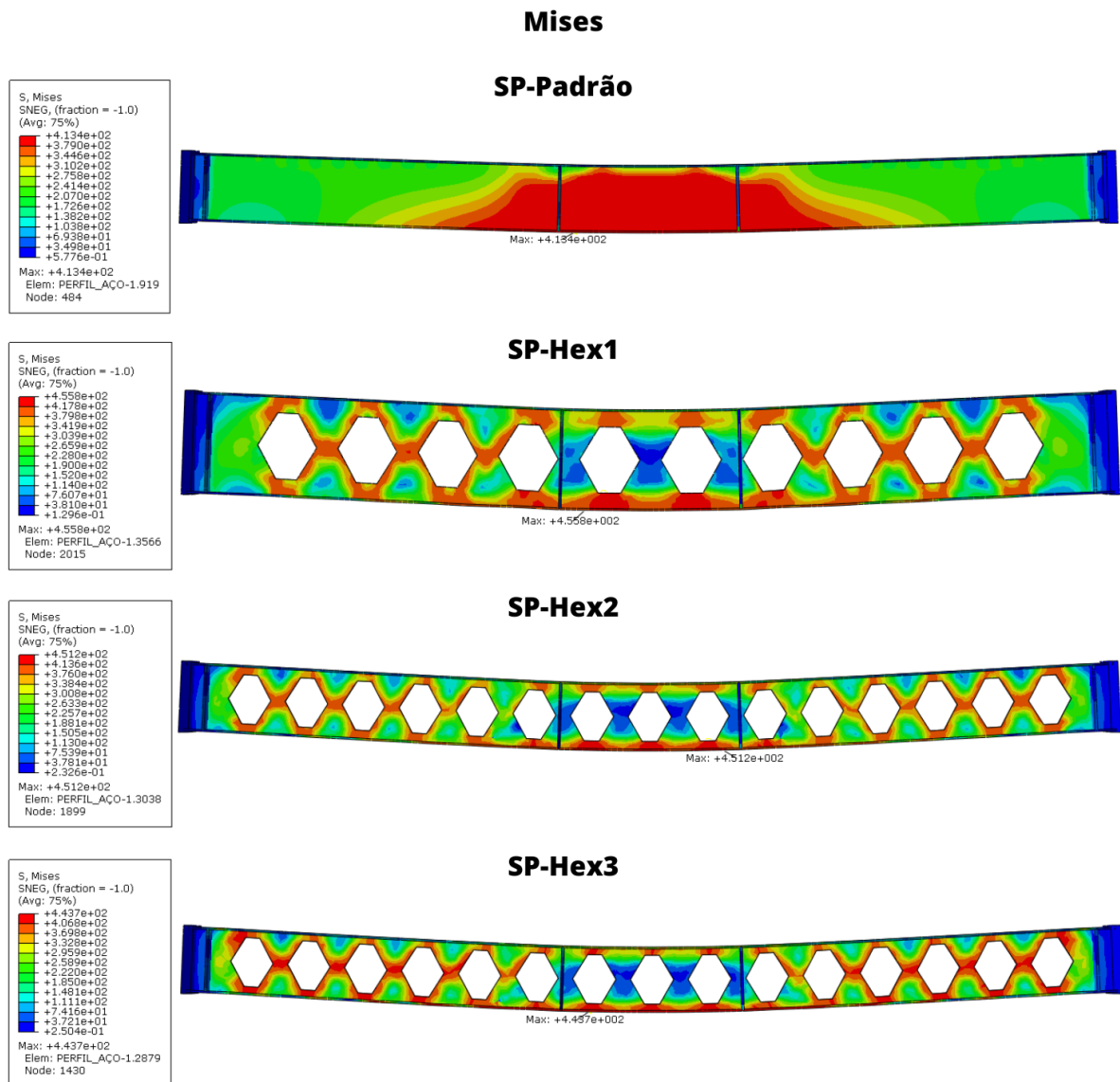


Figura 6.13 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

Tabela 6.9 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	413,4	-
5	SP-Hex1	455,8	+10%
6	SP-Hex2	451,2	+9%
7	SP-Hex3	443,7	+7%

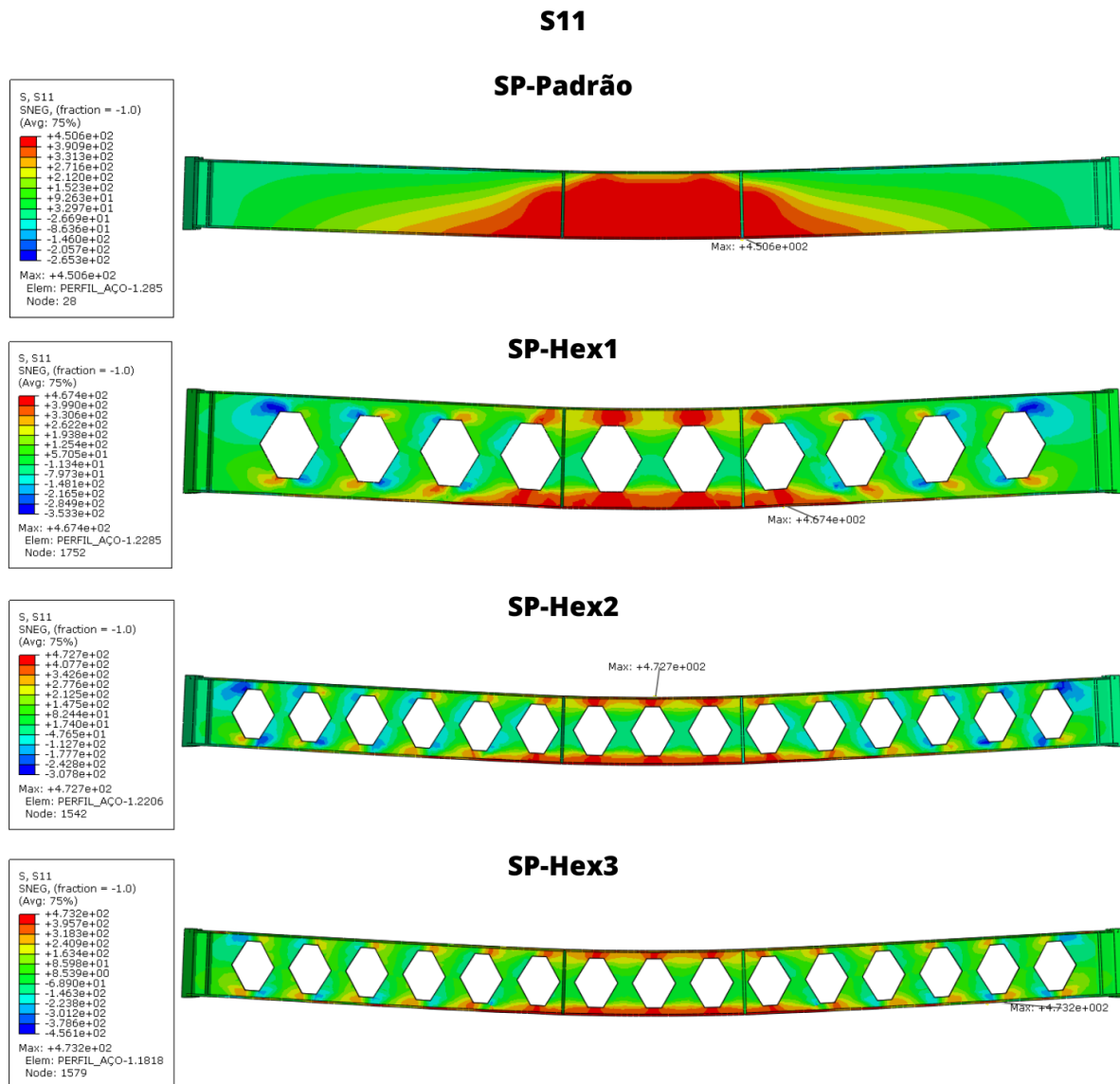


Figura 6.14 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

Tabela 6.10 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	450,6	-
5	SP-Hex1	467,4	+4%
6	SP-Hex2	472,7	+5%
7	SP-Hex3	473,2	+5%

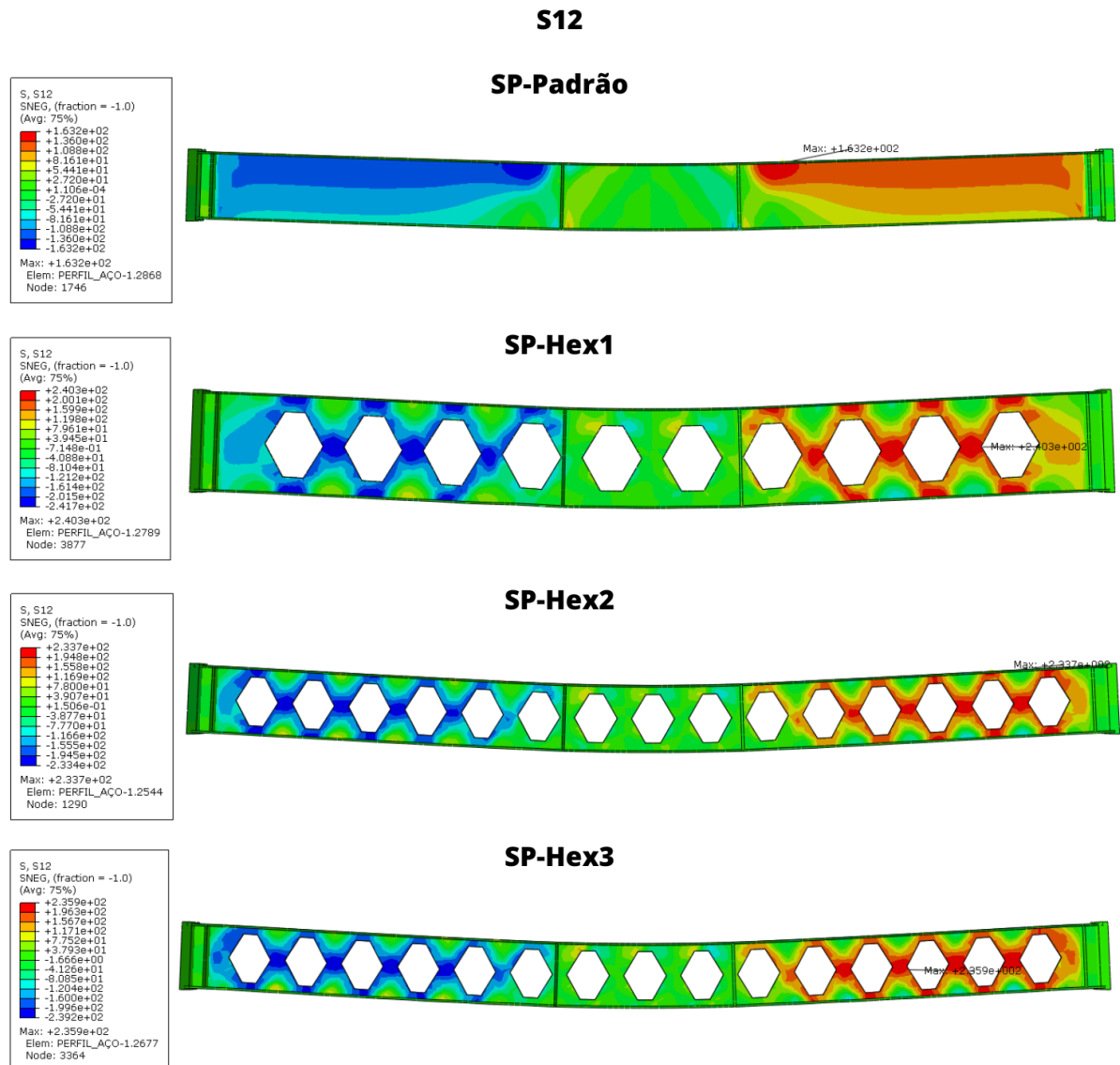


Figura 6.15 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

Tabela 6.11 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos hexagonais sem protensão.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	163,2	-
5	SP-Hex1	240,3	+47%
6	SP-Hex2	233,7	+43%
7	SP-Hex3	235,9	+45%

### 6.2.3 Alvéolos Diamantes

Inserindo os alvéolos de com formatos diamantes, uma comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.16.

A Tabela 6.12 mostra os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas com alvéolos com formato diamante sem protensão, comparando esses valores com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.13 apresenta os pesos e as alturas finais dos perfis de aço com alvéolos diamantes, também sem protensão.

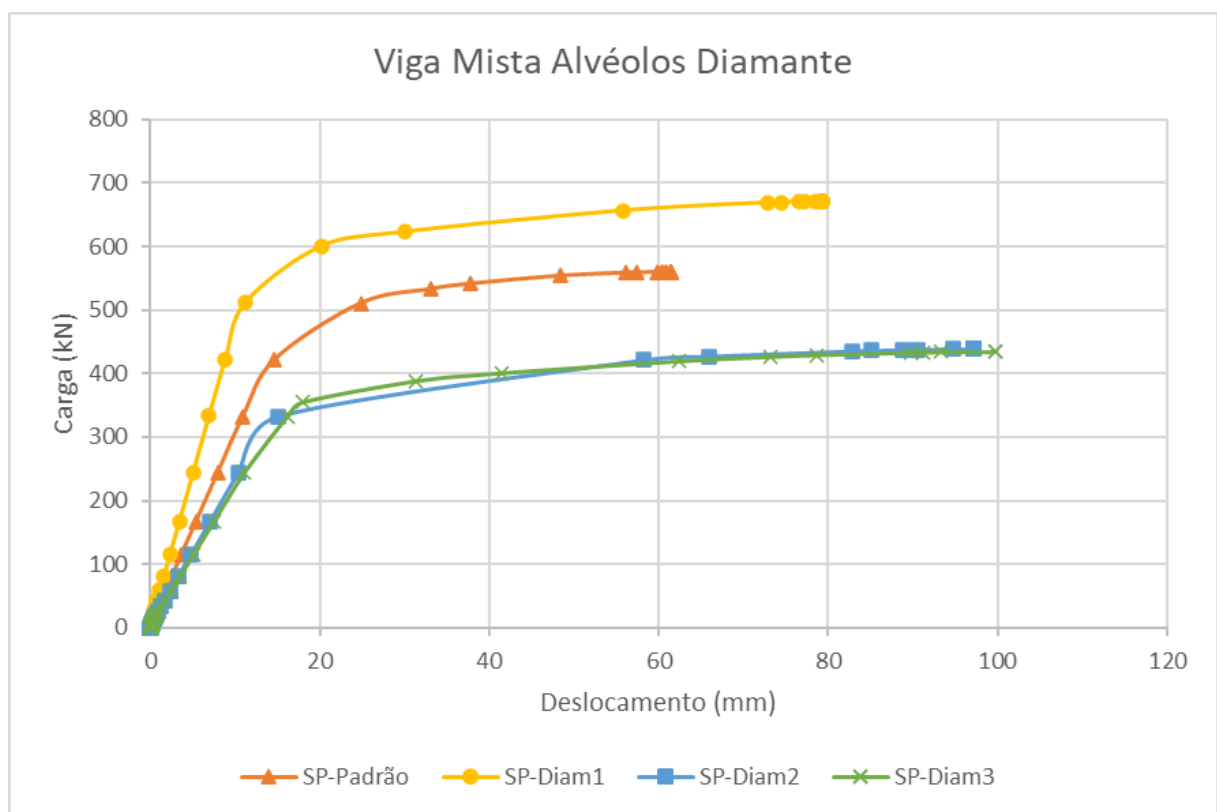


Figura 6.16 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos diamantes sem protensão.

Tabela 6.12 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos diamantes sem protensão.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
1	SP-Padrão	61,40	-	560,02	-
8	SP-Diam1	79,28	+29,1%	670,78	+19,8%
9	SP-Diam2	97,14	+58,2%	438,94	-21,6%
10	SP-Diam3	99,72	+62,4%	434,39	-22,4%

Tabela 6.13 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos diamantes.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
1	SP-Padrão	221,75	-	352	-
8	SP-Diam1	243,74	+10%	525,2	+49%
9	SP-Diam2	198,76	-10%	352	0,0%
10	SP-Diam3	160,33	-28%	338,57	-4%

A Tabela 6.12 mostra o impacto estrutural causado pela introdução de alvéolos em formato de diamante nas vigas mistas sem protensão. Os resultados evidenciam variações significativas nos deslocamentos máximos e na capacidade de carga.

A viga SP-Diam1 apresentou um aumento moderado no deslocamento máximo (29,1%) e uma expressiva melhora na carga máxima suportada (19,8%). Isso indica que sua configuração geométrica foi eficaz para melhorar a capacidade de carga, possivelmente devido a uma distribuição equilibrada das tensões e ao aumento da altura efetiva do perfil.

Por outro lado, as vigas SP-Diam2 e SP-Diam3 registraram deslocamentos máximos significativamente maiores (58,2% e 62,4%, respectivamente), acompanhados de uma redução considerável nas cargas máximas suportadas (-21,6% e -22,4%). Esses resultados sugerem que a redução de material nessas vigas, combinada com uma geometria menos eficiente, comprometeu a rigidez e a resistência global das estruturas.



A análise da Tabela 6.13 mostra o impacto das aberturas em formato de diamante no peso e na altura total das vigas mistas sem protensão. As variações observadas refletem estratégias distintas de dimensionamento para equilibrar a resistência estrutural e a redução de material.

A viga SP-Diam1 apresentou um aumento de 10% no peso e de 49% na altura total em relação à viga padrão (SP-Padrão). Esse acréscimo indica uma tentativa bem-sucedida de compensar a perda de material causada pelas aberturas, o que explica sua maior capacidade de carga observada anteriormente.

Por outro lado, as vigas SP-Diam2 e SP-Diam3 apresentaram reduções de peso significativas, de -10% e -28%, respectivamente. A SP-Diam2 manteve a altura da viga padrão, enquanto a SP-Diam3 teve uma altura 4% menor. Essa redução na massa e na altura comprometeu o desempenho estrutural, como indicado pelas quedas nas cargas máximas suportadas.

Esses resultados reforçam a importância de um projeto geométrico equilibrado. A combinação de uma altura adequada e uma distribuição otimizada de aberturas pode aumentar a eficiência estrutural, enquanto uma redução excessiva de peso e altura compromete significativamente a resistência e a rigidez global.

As Figura 6.17, 6.18, e 6.19 juntamente com as Tabela 6.14, 6.15, e 6.16 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente

A análise da Tabela 6.14 revela um aumento nas tensões máximas de Von Mises nas vigas mistas com alvéolos em formato de diamante sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Diam1 apresentou o maior aumento, de 15%, indicando que a configuração geométrica das aberturas provocou uma concentração significativa de tensões nas regiões ao redor dos vértices dos alvéolos.

As vigas SP-Diam2 e SP-Diam3 apresentaram aumentos menores, de 10% e 9%, respectivamente. Esses valores indicam que uma configuração otimizada das aberturas em formato de diamante pode distribuir as tensões de maneira mais equilibrada, mitigando concentrações excessivas.

Esses resultados mostram que o formato de diamante tende a gerar picos de tensões mais pronunciados nas regiões de interseção das arestas dos alvéolos, especialmente nas bordas

superiores e inferiores da alma. No entanto, ajustes geométricos apropriados podem minimizar esses efeitos e melhorar o desempenho estrutural geral das vigas.

A Tabela 6.15 mostra um aumento moderado nas tensões longitudinais (S11) nas vigas mistas com alvéolos em formato de diamante sem protensão, em comparação à viga padrão (SP-Padrão).

A viga SP-Diam1 apresentou o maior aumento, de 9%, indicando que, apesar de sua maior altura e peso, as tensões longitudinais foram redistribuídas devido à configuração das aberturas. Esse aumento sugere que as regiões ao redor dos vértices dos alvéolos concentraram as tensões, como esperado para esse tipo de geometria.

As vigas SP-Diam2 e SP-Diam3 registraram aumentos mais moderados, de 8% e 5%, respectivamente. Esses resultados refletem uma redução nas tensões longitudinais proporcional à diminuição de peso e altura dessas vigas. A SP-Diam3, sendo a mais leve e com menor altura, apresentou a menor tensão longitudinal, o que pode estar associado à menor capacidade de carga observada anteriormente.

A análise da Tabela 6.16 revela um aumento significativo nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas mistas com alvéolos em formato de diamante sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão).

As vigas SP-Diam1, SP-Diam2 e SP-Diam3 apresentaram aumentos nas tensões cisalhantes de 45%, 46% e 47%, respectivamente. Esses valores indicam uma redistribuição crítica dos esforços ao redor das aberturas, especialmente nas regiões de vértices dos alvéolos, onde ocorre maior concentração de tensões devido às descontinuidades geométricas.

A pequena variação entre os três modelos sugere que, independentemente do tamanho e do espaçamento dos alvéolos, as tensões cisalhantes atingiram níveis elevados em todos os casos. Isso pode ser atribuído à forma pontiaguda dos vértices das aberturas em formato de diamante, que intensificam as tensões de corte na alma das vigas.

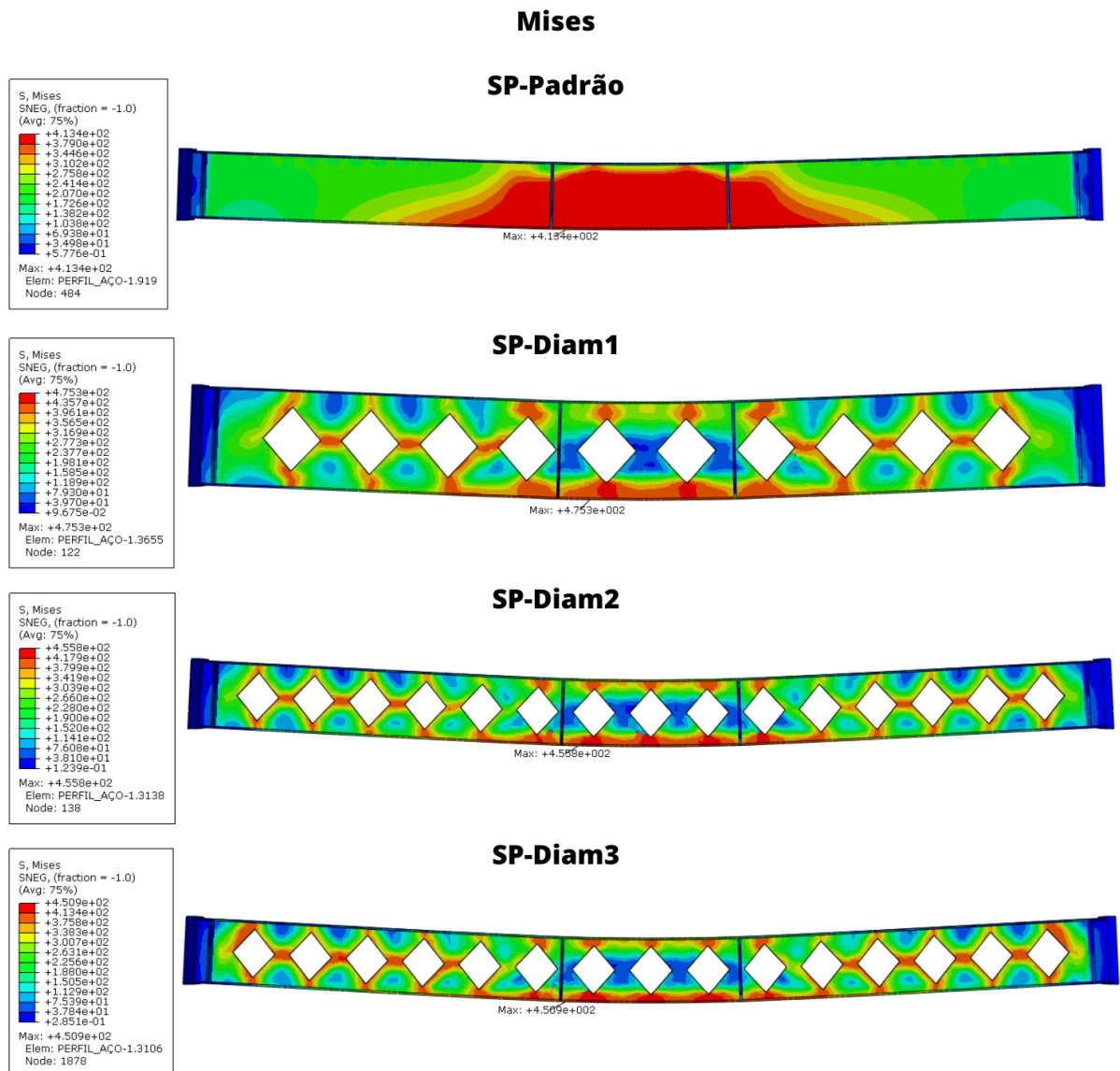


Figura 6.17 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

Tabela 6.14 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	413,4	-
8	SP-Diam1	475,3	+15%
9	SP-Diam2	455,8	+10%
10	SP-Diam3	450,9	+9%

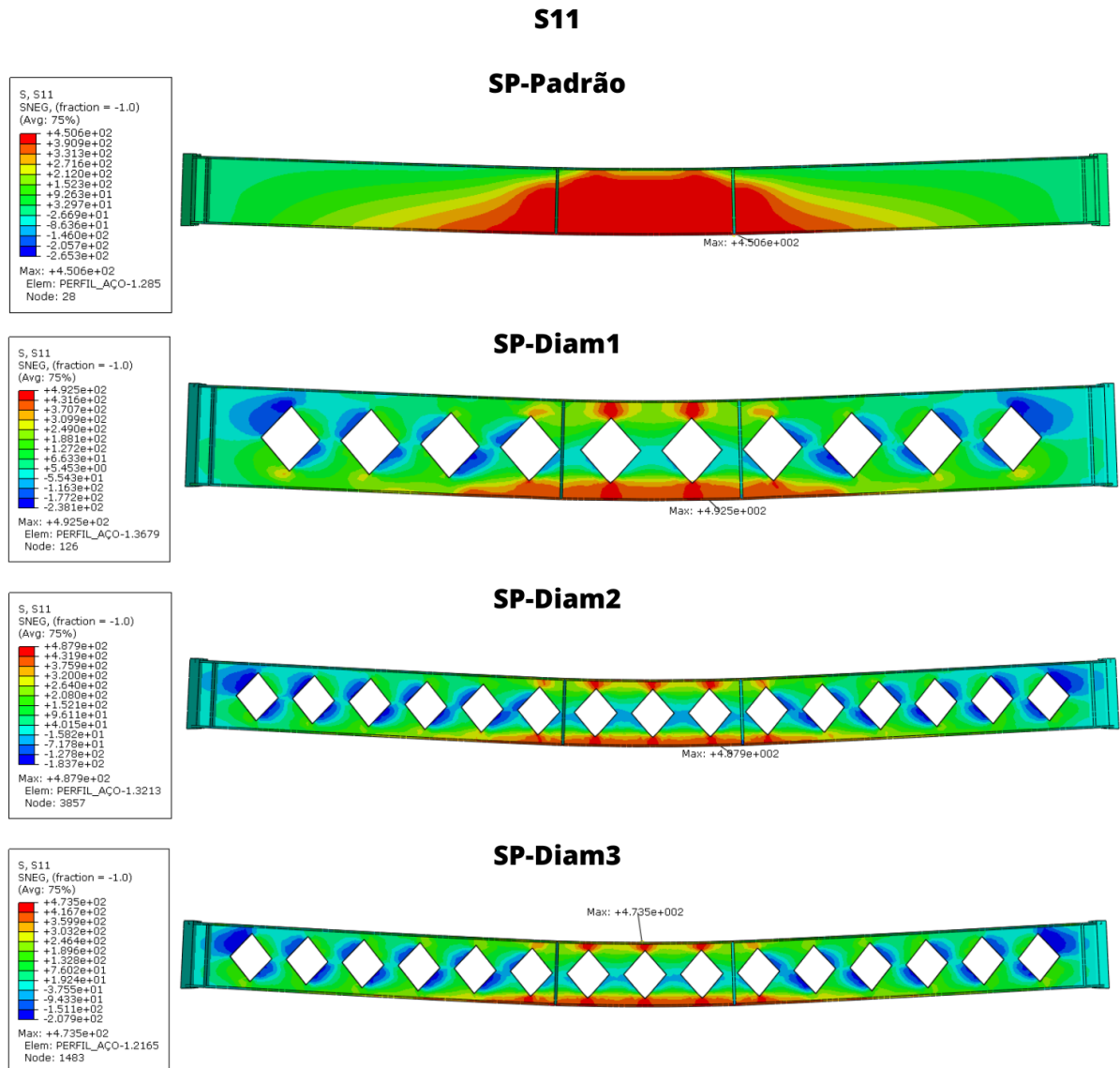


Figura 6.18 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

Tabela 6.15 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	450,6	-
8	SP-Diam1	492,5	+9%
9	SP-Diam2	487,9	+8%
10	SP-Diam3	473,5	+5%

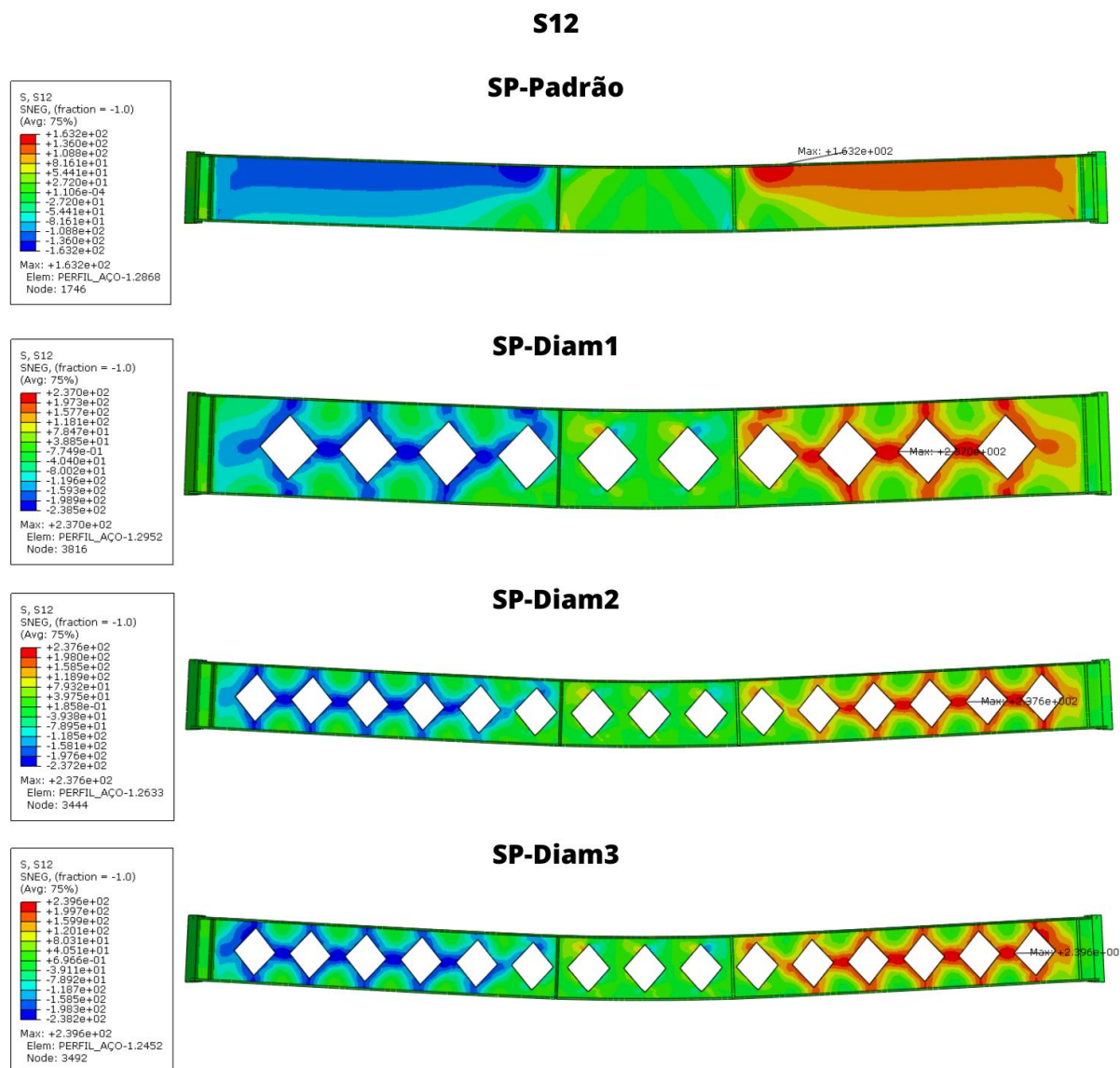


Figura 6.19 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

Tabela 6.16 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos diamantes sem protensão.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	163,2	-
8	SP-Diam1	237,0	+45%
9	SP-Diam2	237,6	+46%
10	SP-Diam3	239,6	+47%

#### 6.2.4 Alvéolos Retangulares

Inserindo os alvéolos de com retangulares, uma comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.20.

A Tabela 6.17 mostra os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas com alvéolos retangulares sem protensão, comparando esses valores com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.18 apresenta os pesos e as alturas finais dos perfis de aço com alvéolos retangulares, também sem protensão.

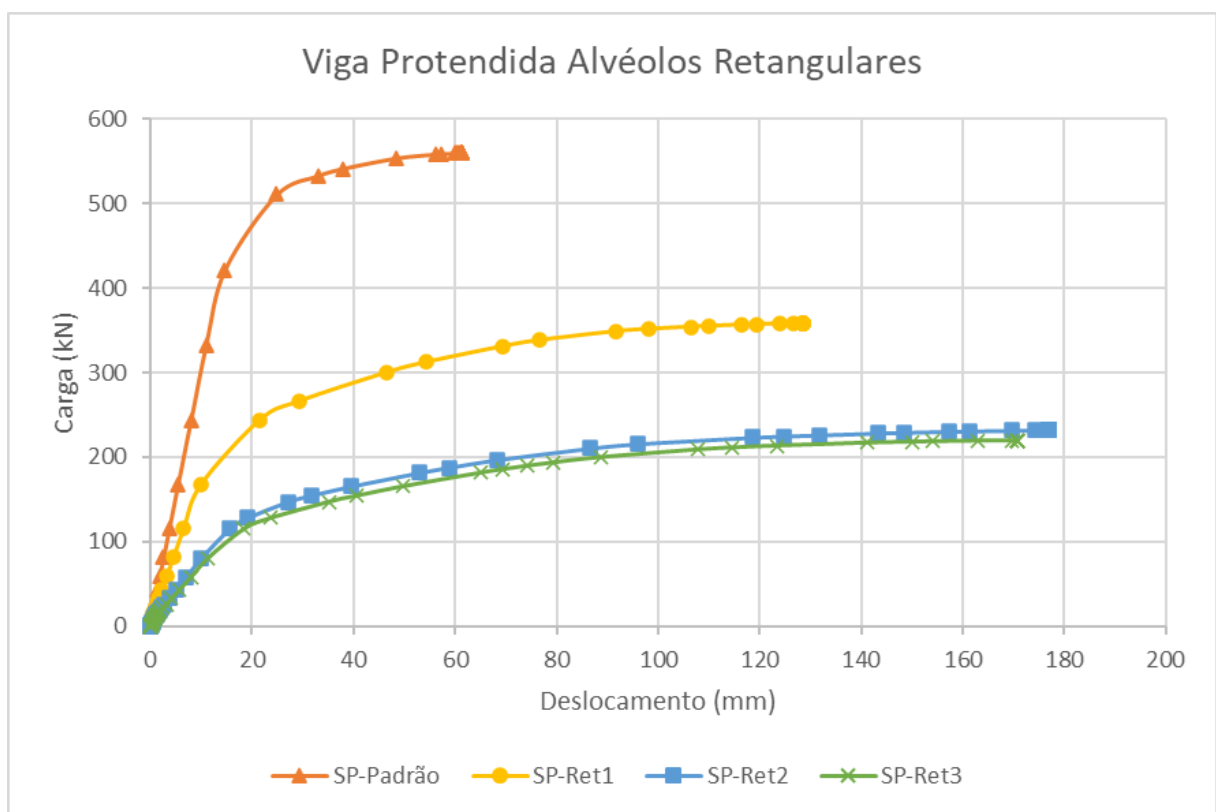


Figura 6.20 - Curva carga x deslocamento das vigas com alvéolos retangulares sem protensão.

Tabela 6.17 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas com alvéolos retangulares sem protensão.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
1	SP-Padrão	61,40	-	560,02	-
11	SP-Ret1	128,59	+109,4%	358,27	-36,0%
12	SP-Ret2	176,90	+188,1%	231,92	-58,6%
13	SP-Ret3	170,79	+178,1%	219,74	-60,8%

Tabela 6.18 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos retangulares.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
1	SP-Padrão	221,75	-	352	-
11	SP-Ret1	215,08	-3%	525,2	+49%
12	SP-Ret2	175,98	-21%	352	0,0%
13	SP-Ret3	137,55	-38%	338,57	-4%

A análise da Tabela 6.17 indica um aumento expressivo nos deslocamentos máximos e uma redução significativa nas cargas máximas aplicadas nas vigas com alvéolos retangulares sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão).

A viga SP-Ret1 apresentou um aumento de 109,4% no deslocamento máximo, acompanhado de uma redução de 36,0% na carga máxima. Esse desempenho sugere uma perda moderada de rigidez estrutural devido à presença de alvéolos retangulares, embora ainda mantenha parte de sua capacidade de carga.

As vigas SP-Ret2 e SP-Ret3 exibiram deslocamentos máximos muito elevados (188,1% e 178,1%) e quedas acentuadas nas cargas máximas (-58,6% e -60,8%, respectivamente). Esses resultados indicam uma perda significativa de rigidez e resistência estrutural devido à maior redução de material e à distribuição menos eficiente das aberturas retangulares.

A análise da Tabela 6.18 revela variações significativas no peso e na altura total das vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão).

A viga SP-Ret1 apresentou uma redução de 3% no peso e um aumento expressivo de 49% na altura total. Esse aumento na altura indica uma estratégia de compensação estrutural para melhorar a rigidez e a resistência, apesar da leve perda de material. Essa configuração justifica seu desempenho estrutural relativamente superior em comparação às demais vigas analisadas.

A viga SP-Ret2 mostrou uma redução de 21% no peso, mantendo a altura da viga padrão. A ausência de aumento na altura combinada à perda de material comprometeu sua rigidez e capacidade de carga, como evidenciado nas análises anteriores.

Por fim, a viga SP-Ret3 apresentou a maior redução de peso, de 38%, e uma diminuição de 4% na altura total, indicando uma significativa perda de massa estrutural e, conseqüentemente, uma queda acentuada em sua resistência e rigidez.

Em resumo, a análise mostra que a compensação geométrica por meio do aumento da altura foi eficiente na viga SP-Ret1, enquanto a falta de ajustes na altura das vigas SP-Ret2 e SP-Ret3 resultou em um desempenho estrutural substancialmente inferior. Isso destaca a importância de um balanceamento adequado entre peso e altura para maximizar a eficiência estrutural.

As Figura 6.21, 6.22, e 6.23 juntamente com as Tabela 6.19, 6.20, e 6.21 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A análise da Tabela 6.19 mostra um aumento considerável nas tensões máximas de Von Mises nas vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão).

A viga SP-Ret1 apresentou o maior aumento, de 20%, indicando uma concentração significativa de tensões nas regiões próximas às bordas dos alvéolos devido à maior altura do perfil e ao formato retangular das aberturas, que gera cantos críticos suscetíveis a concentrações de tensões.

As vigas SP-Ret2 e SP-Ret3 apresentaram aumentos mais moderados, de 12% e 10%, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada à redução de peso e altura nessas vigas, o que resultou em uma menor capacidade de redistribuição das tensões e maior vulnerabilidade a falhas nas regiões das aberturas.



Esses resultados indicam que o formato retangular dos alvéolos gera concentrações acentuadas de tensões nas bordas e cantos das aberturas, exigindo um dimensionamento cuidadoso para minimizar esses efeitos e aumentar a eficiência estrutural das vigas.

A Tabela 6.20 mostra um aumento moderado nas tensões longitudinais (S11) nas vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão em comparação à viga padrão (SP-Padrão). A viga SP-Ret1 apresentou o maior aumento, de 6%, possivelmente devido ao aumento significativo na altura do perfil, que redistribuiu as tensões longitudinais ao longo da seção. Esse comportamento indica que, apesar da presença de alvéolos, o perfil mais alto ajudou a conter o aumento das tensões longitudinais.

As vigas SP-Ret2 e SP-Ret3 apresentaram aumentos semelhantes, de 5% cada. Esses resultados refletem uma redistribuição de esforços menos eficiente, devido à redução de material e à altura menor, o que aumentou a concentração de tensões em regiões críticas próximas às bordas dos alvéolos.

A análise das tensões cisalhantes (S12) nas vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão, apresentadas na Tabela 6.21, evidencia um aumento expressivo nas tensões devido à presença das aberturas. A viga SP-Ret1 apresentou um aumento de 39% na tensão cisalhante, indicando que a introdução de alvéolos retangulares resultou em concentrações de tensões nas bordas das aberturas. Apesar disso, sua maior altura ajudou a distribuir parcialmente esses esforços.

A viga SP-Ret2 apresentou o maior valor, com um aumento de 44%, provavelmente devido à ausência de aumento na altura do perfil combinado à significativa perda de material, o que comprometeu sua capacidade de resistir aos esforços de cisalhamento. A viga SP-Ret3 também registrou um aumento de 39%, semelhante ao da SP-Ret1, mas sem a vantagem de uma altura maior, sugerindo que o formato retangular das aberturas gerou concentrações críticas de tensões.

Esses resultados reforçam que os alvéolos retangulares tendem a intensificar as tensões cisalhantes devido à presença de cantos vivos, agudos, e à interrupção do fluxo de tensões na alma. Isso evidencia a necessidade de reforços ou ajustes geométricos para minimizar esses efeitos e melhorar o desempenho estrutural.

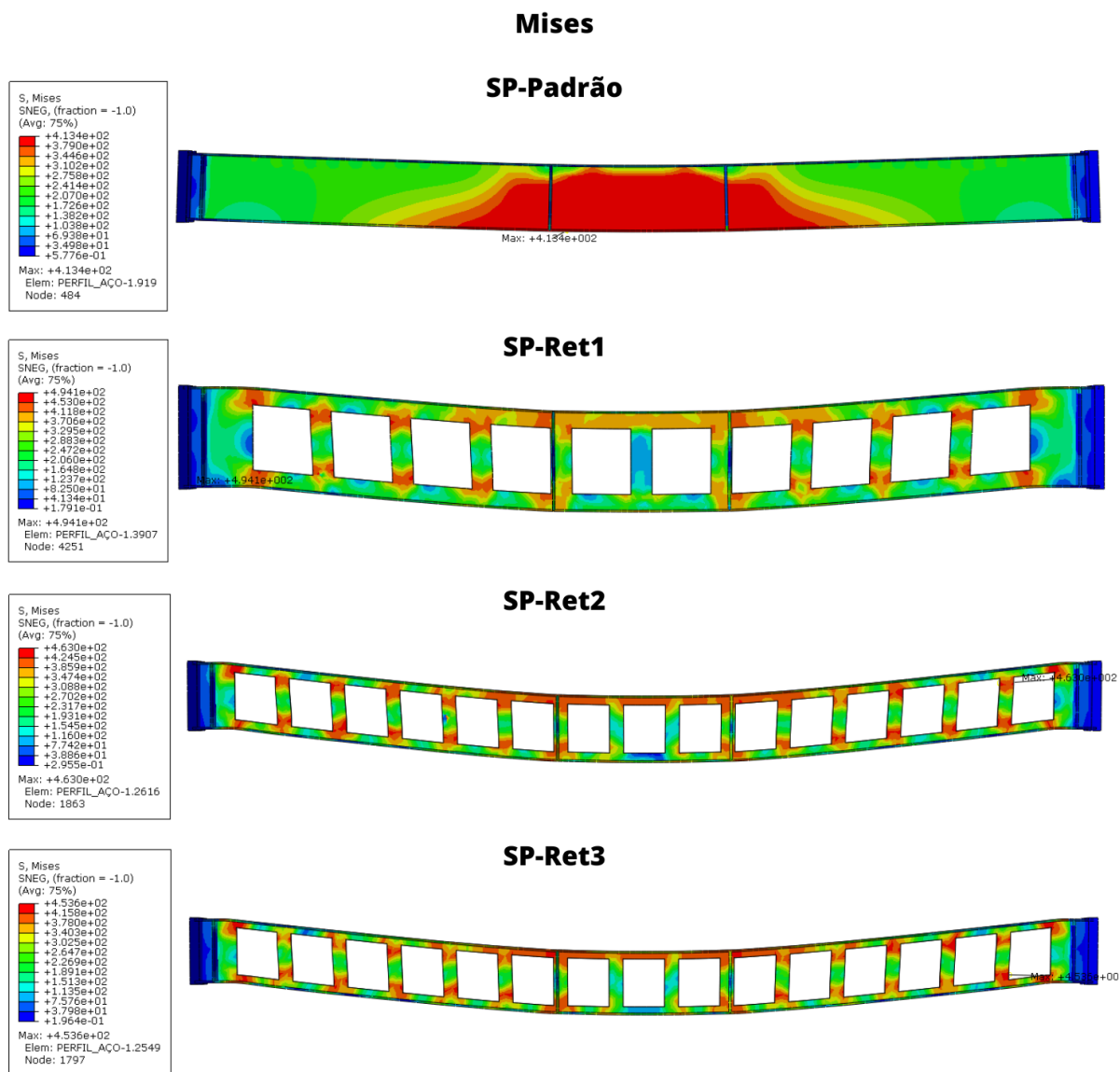


Figura 6.21 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

Tabela 6.19 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	413,4	-
11	SP-Ret1	494,1	+20%
12	SP-Ret2	463,0	+12%
13	SP-Ret3	453,6	+10%

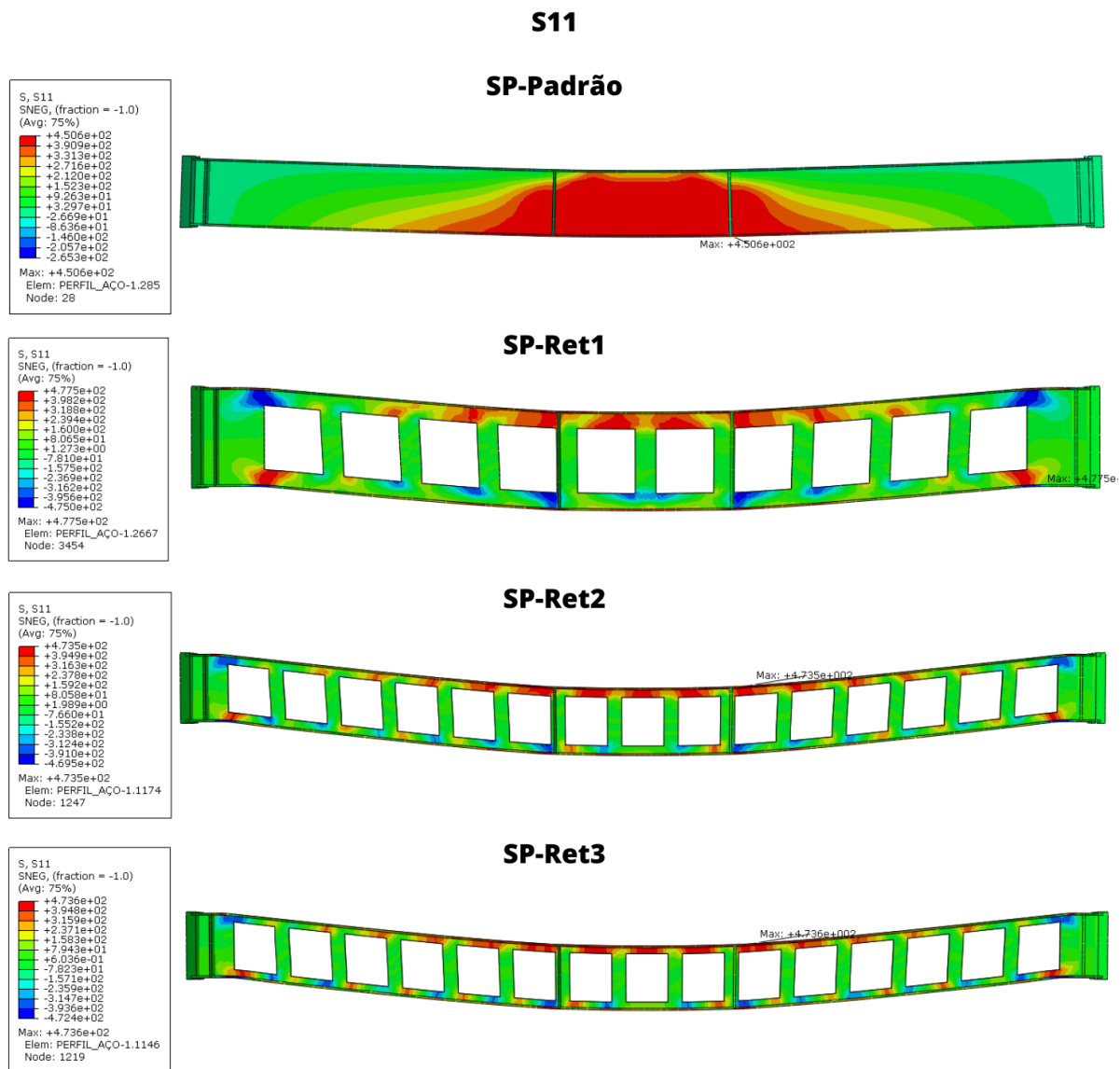


Figura 6.22 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

Tabela 6.20 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	450,6	-
11	SP-Ret1	477,5	+6%
12	SP-Ret2	473,5	+5%
13	SP-Ret3	473,6	+5%

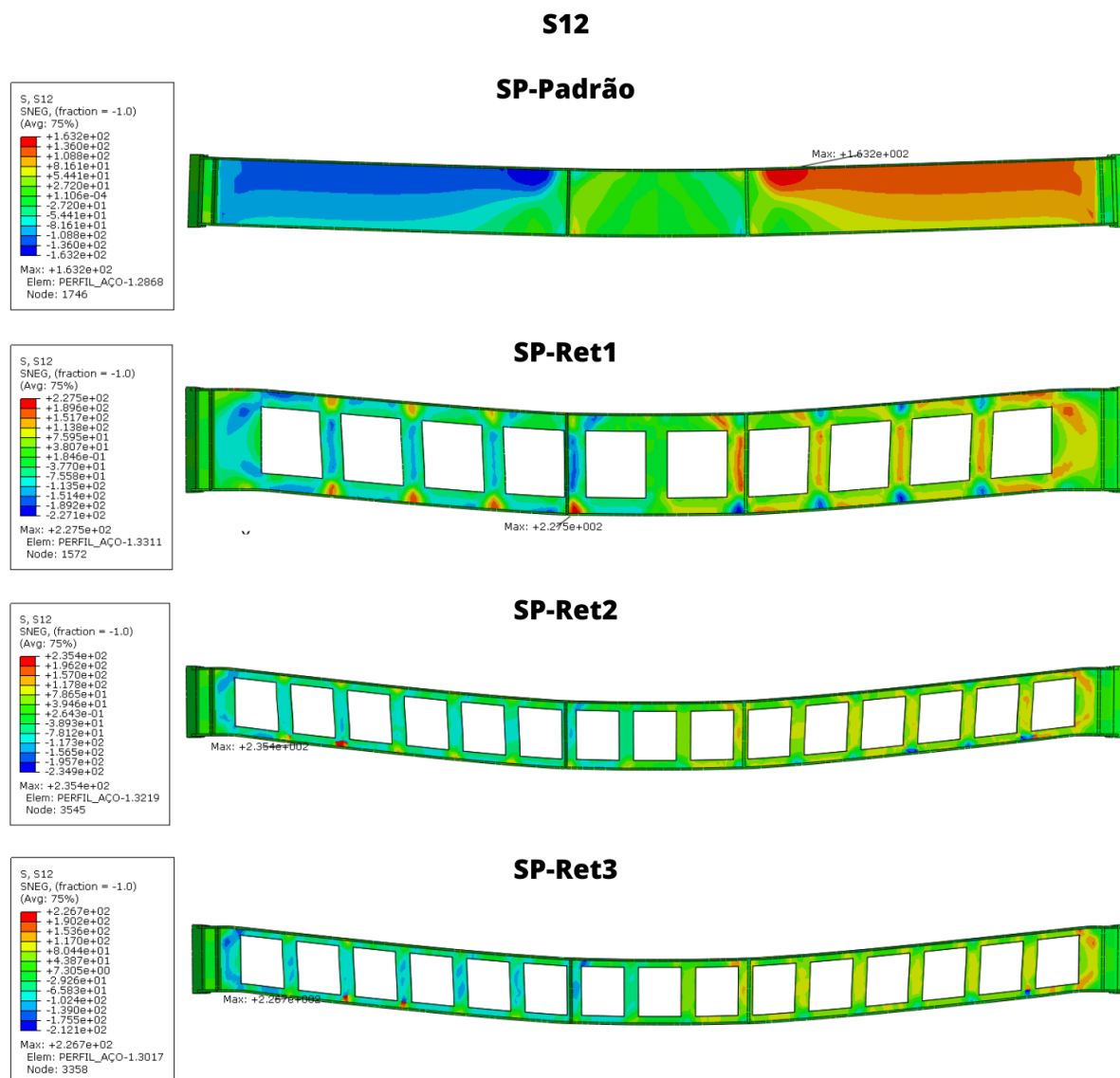


Figura 6.23 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

Tabela 6.21 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas com alvéolos retangulares sem protensão.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
1	SP-Padrão	163,2	-
11	SP-Ret1	227,5	+39%
12	SP-Ret2	235,4	+44%
13	SP-Ret3	226,7	+39%

### 6.3 VIGAS MISTAS ALVEOLADAS PROTENDIDAS

Após a finalização da modelagem das vigas mistas alveoladas, foram inseridos cabos de protensão nas estruturas para avaliar o impacto desse reforço no desempenho estrutural. A seguir, são apresentados e analisados os resultados obtidos, considerando parâmetros como deslocamentos, tensões e capacidade de carga, destacando os benefícios estruturais proporcionados pela aplicação da protensão. As dimensões permanecem as mesmas das vigas sem protensão, ilustradas nas Figura 6.4 a Figura 6.7, numeradas de 14 a 26.

#### 6.3.1 Alvéolos Circulares

Seguindo a mesma metodologia, foram inseridos os furos circulares (tipos 1, 2 e 3) na viga mista protendida, para avaliar a influência dos alvéolos na estrutura. Uma comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.24.

A Tabela 6.22 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas protendidas com alvéolos circulares, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.23 exibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço com alvéolos circulares.

Tabela 6.22 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos circulares.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
15	Prot-Circ1	112,04	+115,7%	570,77	-20,9%
16	Prot-Circ2	99,17	+91,0%	474,19	-34,2%
17	Prot-Circ3	98,19	+89,1%	409,36	-43,2%

Tabela 6.23 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos circulares.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
14	Prot-Padrão	221,75	-	352	-
15	Prot-Circ1	221,04	-0,3%	519,7	+47,6%
16	Prot-Circ2	191,11	-13,8%	352	0,0%
17	Prot-Circ3	154,47	-30,3%	314,68	-10,6%

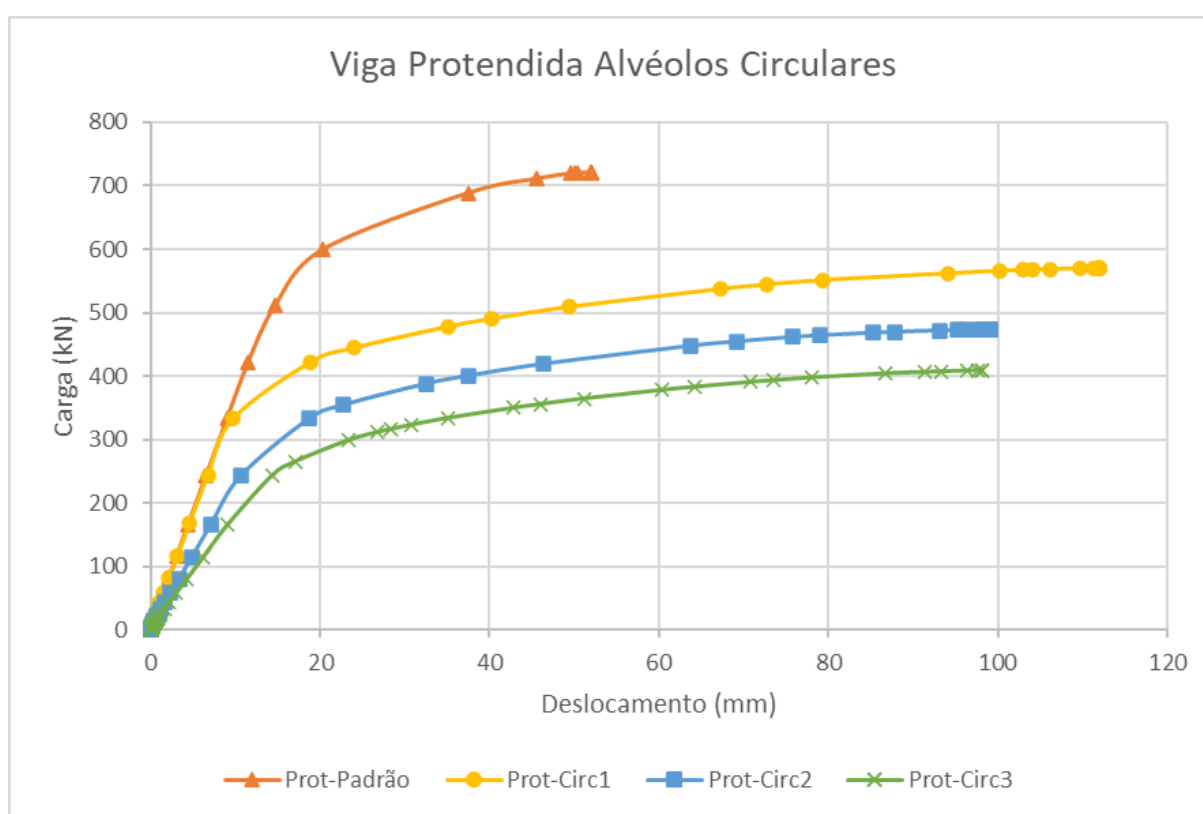


Figura 6.24 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos circulares.

A análise conjunta das Tabela 6.22 e Tabela 6.23 mostra que o desempenho estrutural das vigas protendidas com alvéolos circulares depende diretamente da relação entre peso, altura total do perfil e a presença de protensão.

A viga Prot-Circ1, apesar de permanecer praticamente o mesmo peso da viga padrão (0,3%) e aumentar sua altura em 147,6%, apresentou uma redução moderada de 20,9% na carga máxima e um deslocamento 115,7% maior, indicando que a maior altura ajudou a mitigar os efeitos negativos das aberturas.

Por outro lado, as vigas Prot-Circ2 e Prot-Circ3, com reduções significativas de peso (13,8% e 30,3%, respectivamente) e alturas menores, sofreram grandes perdas de capacidade de carga (-34,2% e -43,2%) e deslocamentos elevados. Isso destaca que a perda de material nas seções críticas não foi compensada de maneira eficaz, resultando em menor rigidez e resistência global.

Em resumo, a inserção de alvéolos circulares só é vantajosa quando acompanhada de um aumento proporcional na altura do perfil para compensar a perda de massa e garantir melhor desempenho estrutural.

As Figura 6.25, 6.26, e 6.27 juntamente com as Tabela 6.24, 6.25, e 6.26 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A análise dos resultados da Tabela 6.24 revela um comportamento estrutural complexo nas vigas mistas protendidas com alvéolos circulares, evidenciado pelo aumento nas tensões máximas de Von Mises em relação à viga padrão (Prot-Padrão). Esse aumento está associado à concentração de tensões nas regiões críticas ao redor das aberturas e à interação entre a protensão e a geometria alveolar.

A viga Prot-Circ1 apresentou um aumento de 16% nas tensões de Von Mises, o maior entre todas as vigas. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento substancial na altura do perfil (47,6%) e à manutenção de um peso próximo ao da viga padrão. Embora esse ajuste geométrico tenha compensado parcialmente a perda de material, a redistribuição das tensões nas regiões próximas aos alvéolos resultou em picos de tensões significativos devido à combinação de esforços normais e momentos fletores introduzidos pela protensão.

As vigas Prot-Circ2 e Prot-Circ3, apesar de apresentarem menores aumentos nas tensões de Von Mises (11% e 10%, respectivamente), enfrentaram um cenário estrutural mais crítico. A Prot-Circ2, com uma altura igual à da viga padrão e uma redução de peso de 13,8%, mostrou um aumento moderado nas tensões, indicando que sua configuração geométrica ainda permitiu uma distribuição razoável de esforços, embora a menor inércia tenha intensificado as tensões em regiões localizadas.

A Prot-Circ3, com uma redução de 30,3% no peso e 10,6% na altura, apresentou uma distribuição de tensões mais crítica devido à menor capacidade de resistir a momentos fletores e à maior suscetibilidade a concentrações de tensões. O aumento de 10% nas tensões de Von

Mises reflete essa limitação estrutural, indicando que a perda de material nas regiões próximas às aberturas não foi adequadamente compensada pela altura reduzida.

A análise da Tabela 6.25 mostra um aumento moderado nas tensões longitudinais (S11) nas vigas mistas protendidas com alvéolos circulares em comparação à viga padrão (Prot-Padrão).

As vigas Prot-Circ1, Prot-Circ2 e Prot-Circ3 apresentaram aumentos semelhantes, variando entre 5% e 6%, indicando uma redistribuição relativamente uniforme das tensões ao longo do eixo longitudinal. O fato de os valores serem próximos sugere que a geometria dos alvéolos circulares e a aplicação da protensão contribuíram para minimizar variações significativas entre as vigas.

A análise da Tabela 6.26 revela um aumento significativo nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas mistas protendidas com alvéolos circulares, em comparação à viga padrão (Prot-Padrão).

A viga Prot-Circ1 apresentou o maior aumento, com uma elevação de 33%, refletindo a concentração de esforços ao redor das bordas dos alvéolos devido à interação entre a protensão e as aberturas. Esse valor mais alto é justificado pela maior altura da viga, que resultou em uma seção mais esbelta e suscetível a esforços cisalhantes nas regiões próximas aos alvéolos.

As vigas Prot-Circ2 e Prot-Circ3, com menores alturas e reduções de peso mais significativas, apresentaram aumentos menores, de 25% e 24%, respectivamente. A ligeira diferença sugere que, apesar das reduções geométricas, a redistribuição das tensões nas áreas próximas aos alvéolos foi semelhante nas duas vigas, possivelmente devido à similaridade na geometria das aberturas.



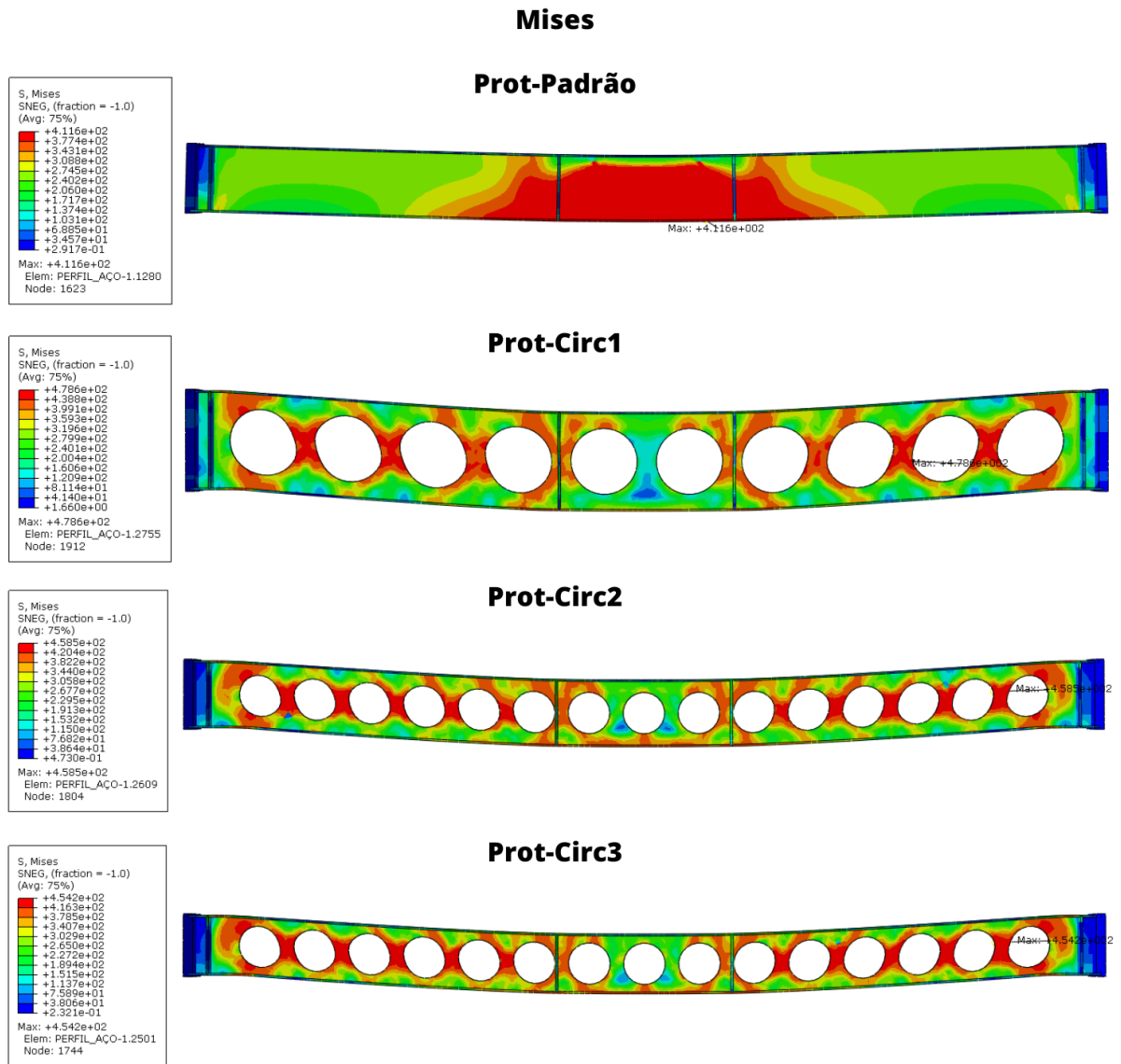


Figura 6.25 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

Tabela 6.24 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	411,6	-
15	Prot-Circ1	478,6	+16%
16	Prot-Circ2	458,5	+11%
17	Prot-Circ3	454,2	+10%

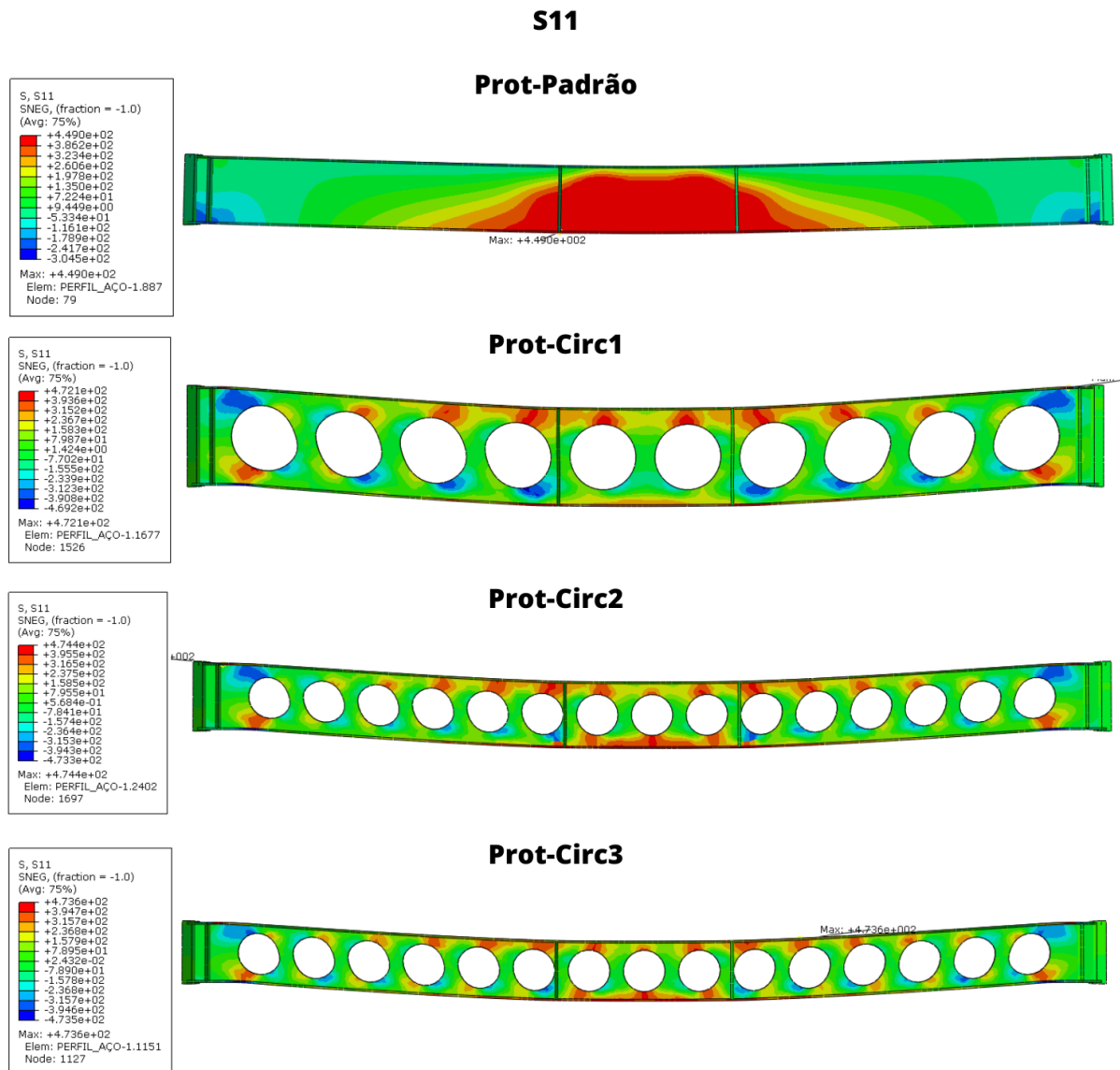


Figura 6.26 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

Tabela 6.25 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	449,0	-
15	Prot-Circ1	472,1	+5%
16	Prot-Circ2	474,4	+6%
17	Prot-Circ3	473,6	+5%

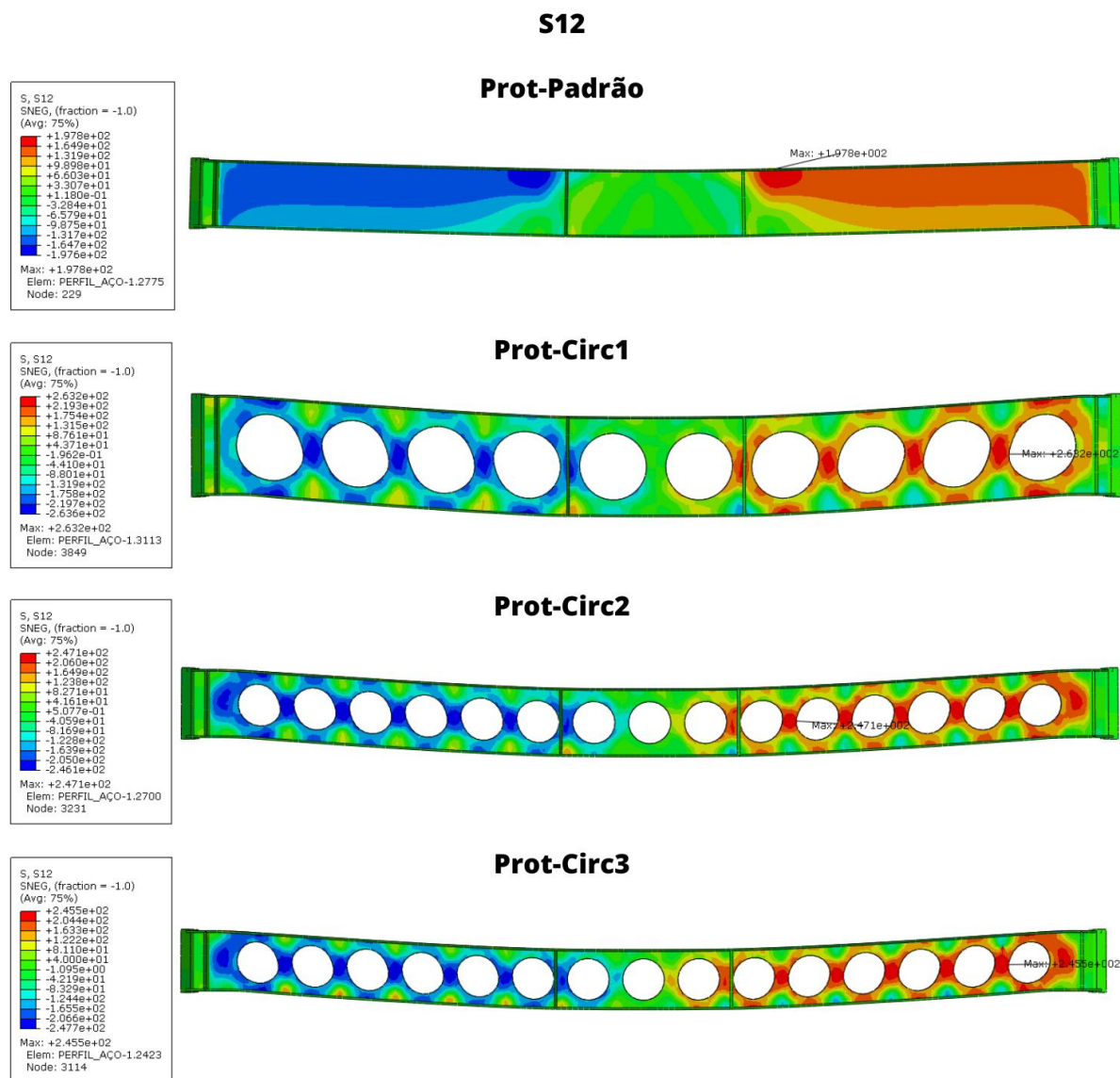


Figura 6.27 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

Tabela 6.26 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos circulares.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	197,8	-
15	Prot-Circ1	263,2	+33%
16	Prot-Circ2	247,1	+25%
17	Prot-Circ3	245,5	+24%

### 6.3.2 Alvéolos Hexagonais

Para os alvéolos hexagonais, a comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme ilustrado na Figura 6.28

A Tabela 6.27 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas protendidas com alvéolos hexagonais, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.28 exibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço com alvéolos hexagonais.

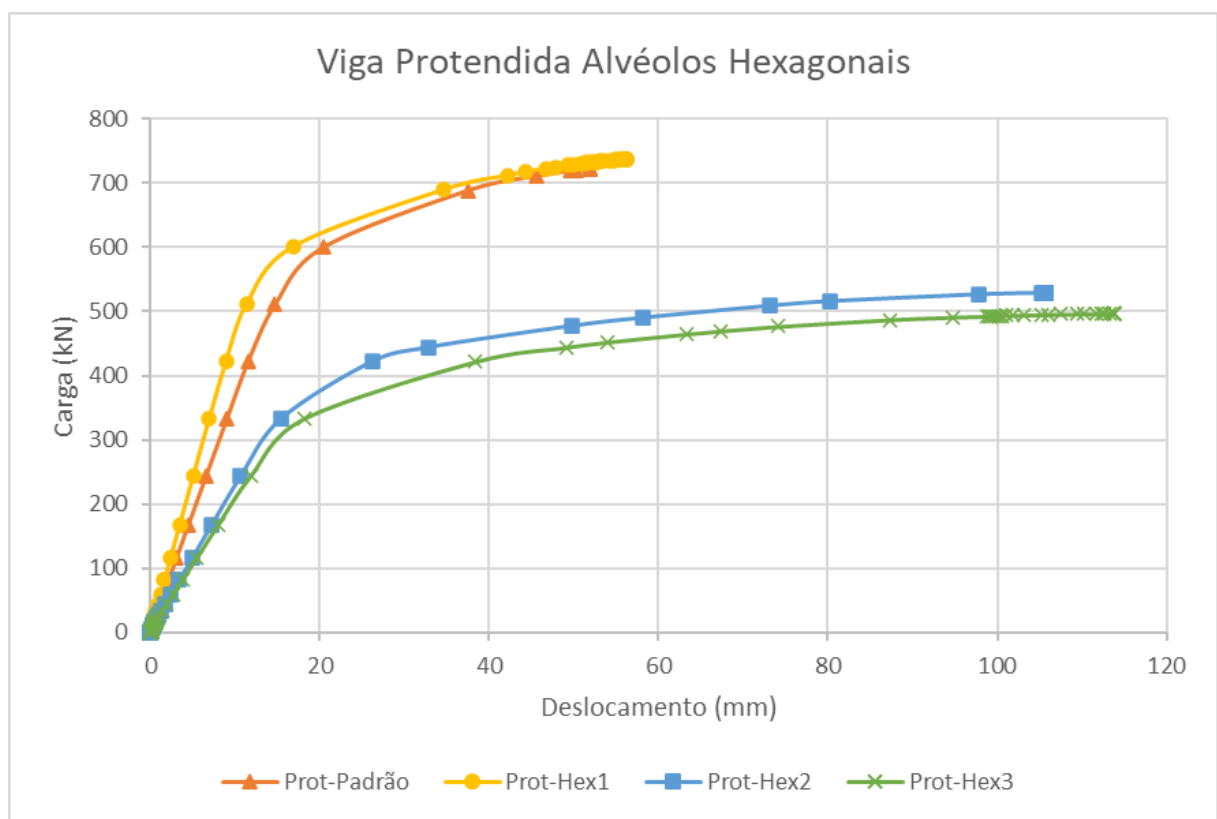


Figura 6.28 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos hexagonais.

Tabela 6.27 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos hexagonais.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
18	Prot-Hex1	56,23	+8,3%	737,09	+2,2%
19	Prot-Hex2	105,75	+103,6%	529,05	-26,6%
20	Prot-Hex3	113,73	+119,0%	496,57	-31,1%

Tabela 6.28 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos hexagonais.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
14	Prot-Padrão	221,75	-	352	-
18	Prot-Hex1	233,57	+5%	525,2	+49%
19	Prot-Hex2	191,17	-14%	352	0,0%
20	Prot-Hex3	152,73	-31%	338,57	-4%

A análise das Tabela 6.27 e 6.28 revela uma relação direta entre o peso, a altura total do perfil e o desempenho estrutural das vigas protendidas com alvéolos hexagonais. Os resultados destacam a importância de uma configuração geométrica adequada para compensar a perda de material causada pelas aberturas.

A viga Prot-Hex1, que apresentou um aumento de 5% no peso e 49% na altura total, demonstrou o melhor desempenho estrutural. Seu deslocamento máximo foi apenas 8,3% maior que o da viga padrão, enquanto sua carga máxima aumentou em 2,2%. Esses resultados indicam que o aumento significativo na altura compensou eficientemente a perda de material devido às aberturas, mantendo uma boa distribuição dos esforços e elevada rigidez estrutural.

Por outro lado, a viga Prot-Hex2, com uma redução de 14% no peso e sem alteração na altura em relação à viga padrão, mostrou um aumento expressivo de 103,6% no deslocamento máximo e uma queda de 26,6% na carga máxima suportada. Isso evidencia que a perda de material nas regiões críticas, sem qualquer aumento na altura do perfil, resultou em uma rigidez significativamente menor e uma pior capacidade de carga.

A viga Prot-Hex3 apresentou o pior desempenho, registrando uma redução de 31% no peso e 4% na altura total. Como consequência, seu deslocamento máximo aumentou em 119%, e sua carga máxima suportada caiu 31,1%. Esses resultados indicam uma perda severa de rigidez estrutural devido à menor altura e ao grande corte de material causado pelos alvéolos hexagonais, comprometendo fortemente sua resistência global.

Em síntese, a viga Prot-Hex1, com maior altura e peso próximo ao da viga padrão, mostrou-se a configuração mais eficiente, evidenciando a importância de um projeto geométrico que equilibre a perda de material e o aumento de altura para maximizar a resistência e minimizar os deslocamentos. As vigas Prot-Hex2 e Prot-Hex3, com suas menores alturas e pesos, destacam a necessidade de uma compensação geométrica adequada para evitar perdas estruturais significativas em vigas com alvéolos hexagonais.

As Figura 6.29, 6.30, e 6.31 juntamente com as Tabela 6.29, 6.30, e 6.31 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A análise da Tabela 6.29 mostra um aumento moderado nas tensões máximas de Von Mises nas vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais, em comparação à viga padrão (Prot-Padrão), refletindo o impacto da presença de aberturas na distribuição dos esforços estruturais.

A viga Prot-Hex1 apresentou um aumento de 12% nas tensões de Von Mises, indicando uma concentração significativa de esforços ao redor das bordas dos alvéolos. Apesar desse aumento, o desempenho dessa viga foi mais equilibrado devido à sua altura consideravelmente maior (+49%) e ao peso ligeiramente superior (+5%), o que permitiu uma melhor redistribuição das tensões.

A viga Prot-Hex2, com uma altura igual à da viga padrão e uma redução de 14% no peso, apresentou um aumento de 11% nas tensões de Von Mises. Isso sugere que, apesar de sua configuração geométrica relativamente estável, a perda de material nas regiões críticas resultou em uma redistribuição menos eficiente dos esforços.

Por outro lado, a viga Prot-Hex3, com a maior redução de peso (-31%) e uma diminuição de 4% na altura, apresentou o maior aumento nas tensões de Von Mises (14%). Esse comportamento reflete a concentração mais intensa de esforços, devido à menor área de seção transversal e à altura reduzida, que limitaram sua capacidade de suportar cargas de forma eficaz.

Esses resultados evidenciam que, embora a protensão tenha ajudado a melhorar a resistência global das vigas, a presença de alvéolos hexagonais intensificou as tensões nas regiões ao redor das aberturas. A Prot-Hex1, devido à sua maior altura e peso próximo ao padrão, demonstrou a melhor distribuição de tensões, enquanto as vigas Prot-Hex2 e Prot-Hex3 sofreram com maiores concentrações de esforços devido às suas configurações geométricas menos eficientes.

A Tabela 6.30 mostra um aumento uniforme de 5% nas tensões longitudinais (S11) em todas as vigas protendidas com alvéolos hexagonais, em comparação à viga padrão (Prot-Padrão). Esse comportamento indica uma redistribuição eficiente dos esforços longitudinais devido à aplicação da protensão, independentemente das variações de altura e peso.

A viga Prot-Hex1, com maior altura (+49%) e peso próximo ao padrão, apresentou uma boa distribuição de esforços, justificando seu desempenho estrutural superior. As vigas Prot-Hex2 e Prot-Hex3, apesar de suas menores alturas e reduções de peso, mantiveram o aumento nas tensões longitudinais, evidenciando que a protensão compensou parcialmente a perda de material, garantindo um comportamento estável nesse critério.

A Tabela 6.31 mostra um aumento expressivo nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas protendidas com alvéolos hexagonais, em comparação à viga padrão (Prot-Padrão), refletindo a concentração de tensões ao redor das aberturas.

A viga Prot-Hex1, com maior altura (+49%) e peso próximo ao padrão, apresentou a maior tensão cisalhante (+33%), devido à maior área exposta nas bordas dos alvéolos e à redistribuição dos esforços resultante da protensão.

As vigas Prot-Hex2 e Prot-Hex3, apesar de suas diferenças de altura e peso, registraram aumentos semelhantes nas tensões cisalhantes (+29% e +32%, respectivamente). Isso indica que a perda de material nas regiões críticas das aberturas hexagonais contribuiu para uma concentração de tensões similar nas duas vigas, independentemente das suas diferenças geométricas.

Esses resultados destacam que, embora a protensão melhore a capacidade de carga e reduza deslocamentos, ela intensifica as tensões cisalhantes, especialmente ao redor das aberturas, exigindo reforços adequados ou ajustes geométricos para mitigar esse efeito.

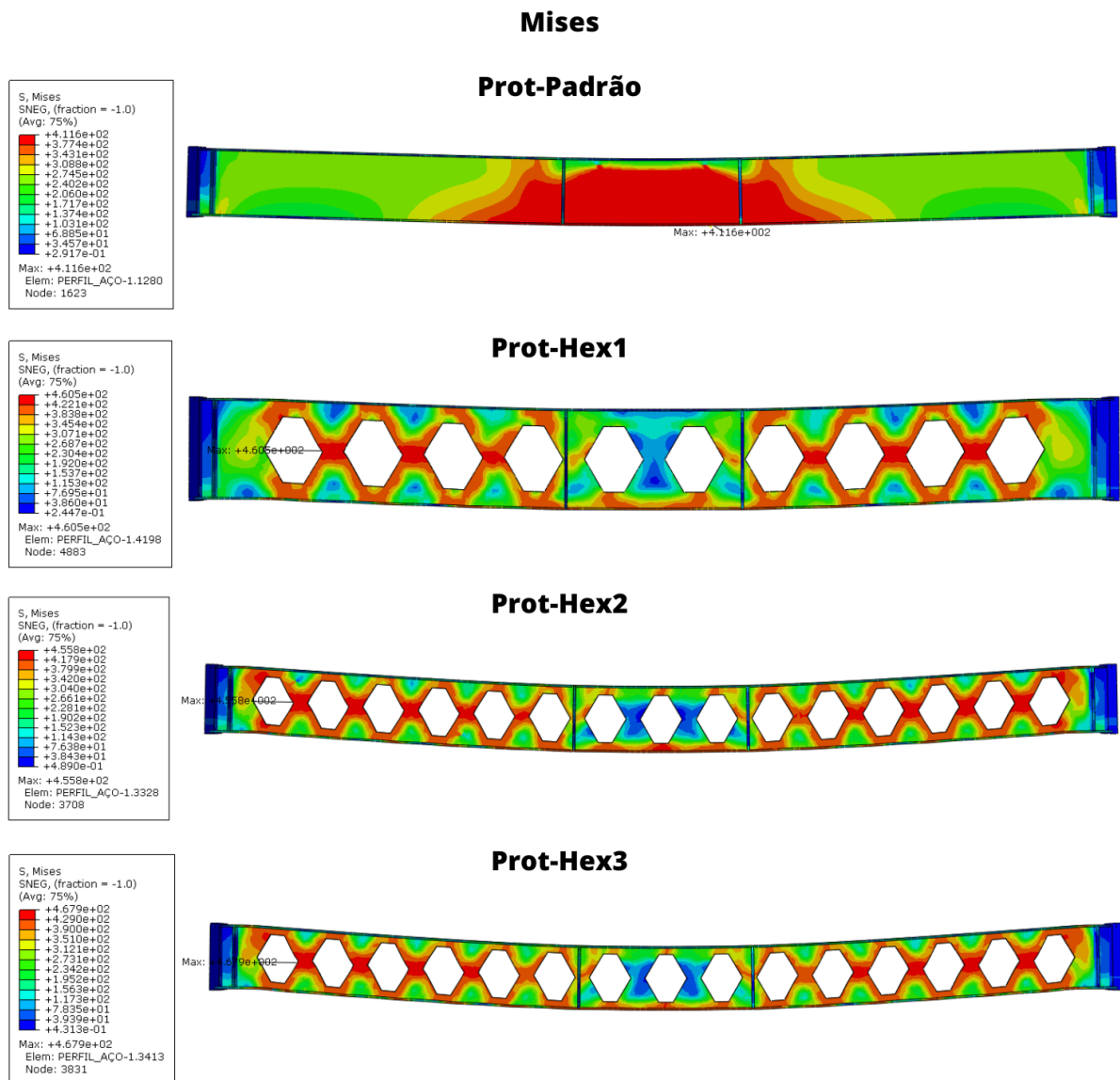


Figura 6.29 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

Tabela 6.29 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	411,6	-
18	Prot-Hex1	460,5	+12%
19	Prot-Hex2	455,8	+11%
20	Prot-Hex3	467,9	+14%



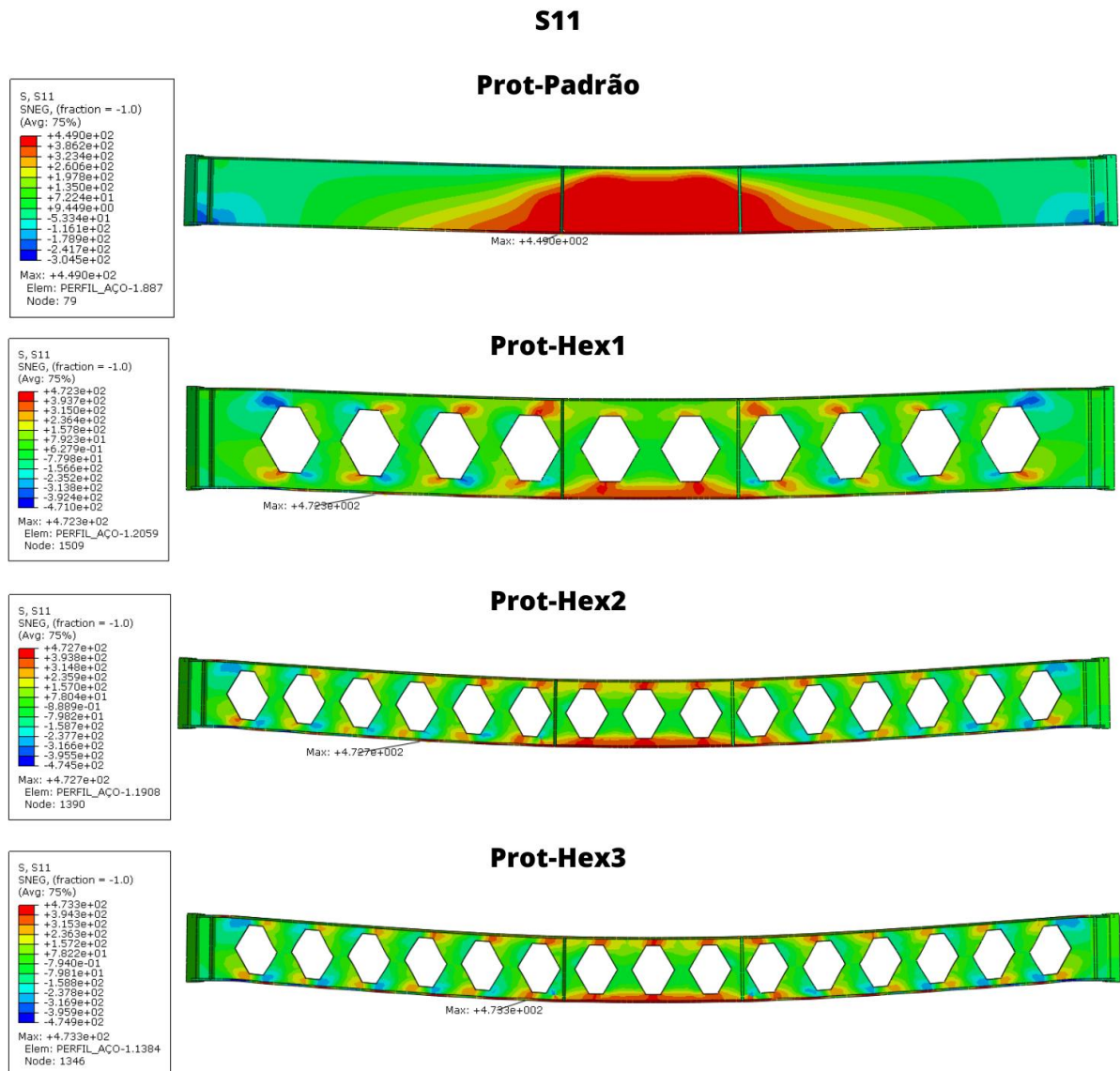


Figura 6.30 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

Tabela 6.30 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	449,0	-
18	Prot-Hex1	472,3	+5%
19	Prot-Hex2	472,7	+5%
20	Prot-Hex3	473,3	+5%

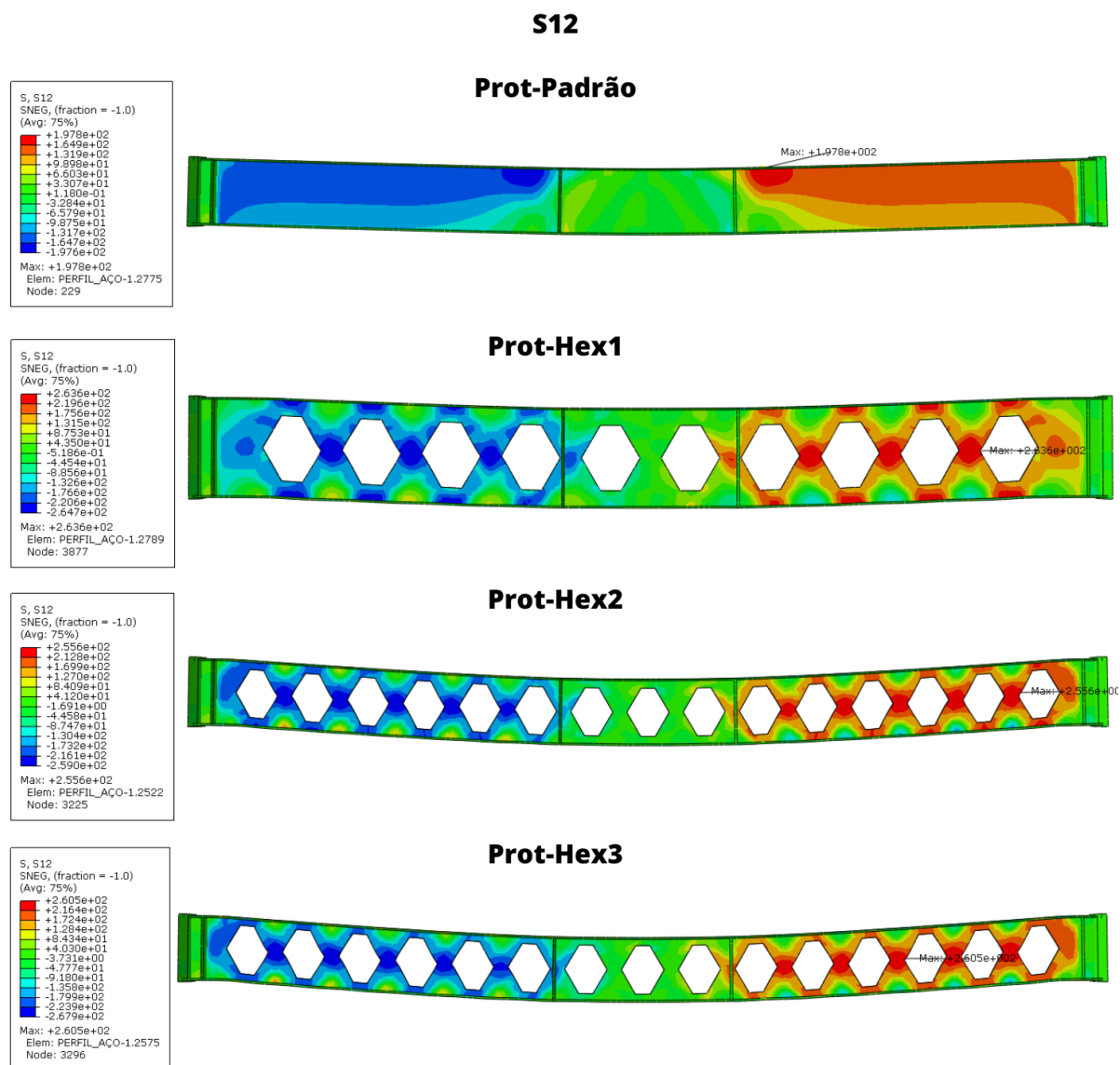


Figura 6.31 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

Tabela 6.31 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	197,8	-
18	Prot-Hex1	263,6	+33%
19	Prot-Hex2	255,6	+29%
20	Prot-Hex3	260,5	+32%

### 6.3.3 Alvéolos Diamantes

Para os alvéolos com formato diamante, a comparação foi realizada considerando as deflexões máximas e a carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.32Figura 6.28

A Tabela 6.33 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas protendidas com alvéolos circulares, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.33 exibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço com alvéolos circulares e sem protensão.

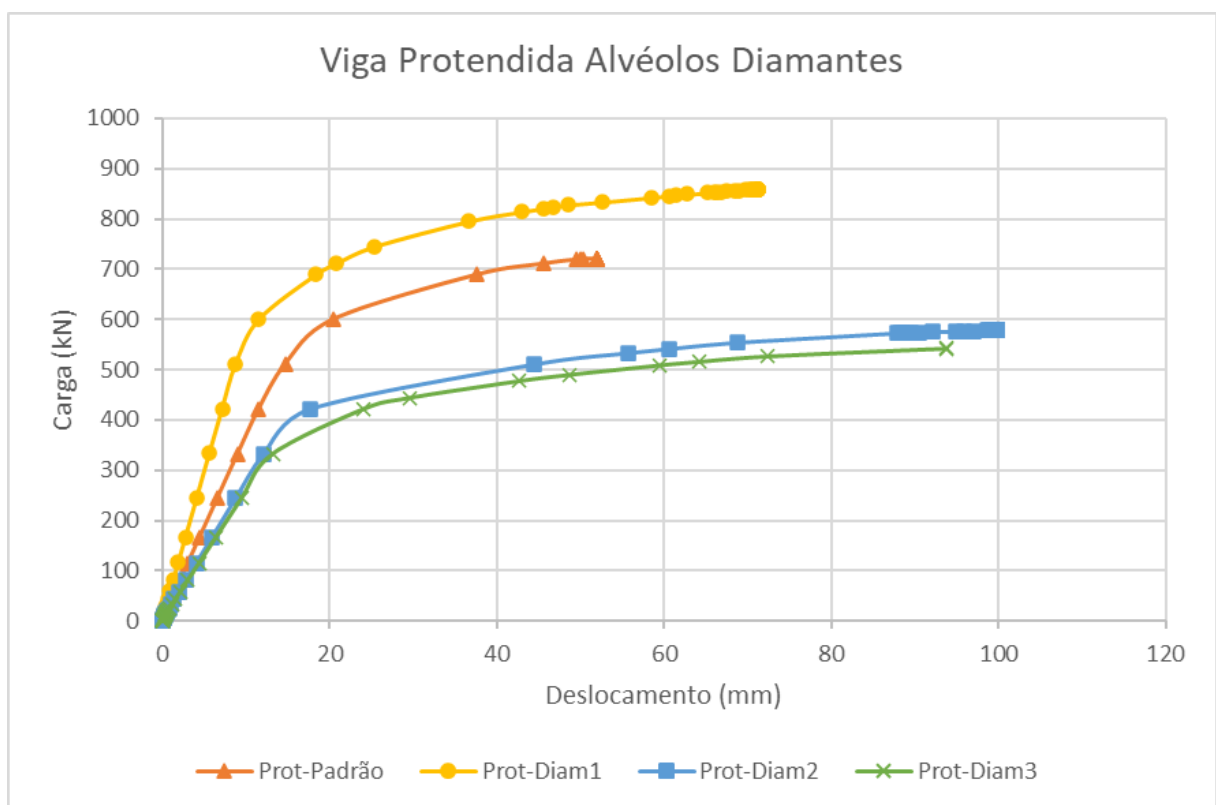


Figura 6.32 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos diamantes.

Tabela 6.32 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos diamantes.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
21	Prot-Diam1	71,27	+37,3%	858,15	+19,0%
22	Prot-Diam2	99,83	+92,2%	577,84	-19,9%
23	Prot-Diam3	93,82	+80,7%	542,26	-24,8%

Tabela 6.33 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos diamantes.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
14	Prot-Padrão	221,75	-	352	-
21	Prot-Diam1	243,74	+10%	525,2	+49%
22	Prot-Diam2	198,76	-10%	352	0,0%
23	Prot-Diam3	160,33	-28%	338,57	-4%

A análise das Tabela 6.32 e 6.33 destaca o impacto da geometria dos alvéolos em formato de diamante nas vigas protendidas, considerando o deslocamento máximo, carga máxima, peso e altura dos perfis.

A viga Prot-Diam1, com um aumento de 10% no peso e 49% na altura, apresentou o melhor desempenho estrutural, registrando um deslocamento máximo 37,3% maior e uma carga máxima 19% superior à da viga padrão. Esse comportamento indica que o aumento substancial na altura compensou efetivamente a presença de alvéolos, resultando em maior rigidez e capacidade de carga, mesmo com tensões mais intensas nas regiões próximas às aberturas.

A viga Prot-Diam2, com uma redução de 10% no peso e sem aumento na altura, apresentou um deslocamento máximo 92,2% maior e uma redução de 19,9% na carga máxima suportada. Isso reflete uma perda significativa de rigidez devido à falta de compensação geométrica para as aberturas, comprometendo a resistência estrutural.

Por sua vez, a viga Prot-Diam3, que apresentou a maior redução de peso (28%) e uma diminuição de 4% na altura, registrou um aumento de 80,7% no deslocamento máximo e uma redução de 24,8% na carga máxima suportada. Isso indica uma perda acentuada de rigidez e resistência, causada pela combinação de uma menor altura e uma maior perda de material nas seções críticas.

Logo, a Prot-Diam1 demonstrou um desempenho superior devido à sua maior altura e peso próximo ao da viga padrão, comprovando que uma compensação geométrica adequada pode mitigar os efeitos negativos das aberturas. As vigas Prot-Diam2 e Prot-Diam3, com suas menores alturas e pesos, apresentaram maiores deslocamentos e reduções consideráveis na capacidade de carga, reforçando a necessidade de ajustes geométricos para melhorar o desempenho estrutural.

As Figura 6.33, 6.34, e 6.35 juntamente com as Tabela 6.34, 6.35, e 6.36 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A análise da Tabela 6.34 mostra um aumento significativo nas tensões máximas de Von Mises nas vigas protendidas com alvéolos em formato de diamante, em comparação à viga padrão (Prot-Padrão). Esses aumentos refletem a redistribuição de tensões causada pela presença de vértices agudos nas aberturas e pela interação dos esforços de protensão.

A viga Prot-Diam1, com um aumento de 19% nas tensões de Von Mises, registrou o maior valor entre as vigas analisadas. Esse comportamento é justificado pelo maior volume de material exposto ao esforço devido à sua altura aumentada (+49%) e à concentração de tensões nas bordas dos alvéolos. Apesar disso, seu desempenho estrutural foi o mais equilibrado devido à melhor compensação geométrica.

A viga Prot-Diam2, com uma redução de 10% no peso e altura inalterada, apresentou um aumento de 14% nas tensões de Von Mises. Isso indica que, apesar da perda de material, sua altura equivalente à da viga padrão permitiu uma redistribuição razoável das tensões, ainda que picos significativos tenham ocorrido nas bordas das aberturas.

A viga Prot-Diam3, com 28% de redução no peso e 4% de diminuição na altura, apresentou um aumento de 17% nas tensões de Von Mises. Essa combinação resultou em maiores concentrações de tensões, devido à menor altura e ao maior número de bordas críticas expostas.

Assim, os resultados mostram que, embora a aplicação da protensão tenha aumentado a capacidade de carga, ela também intensificou as tensões de Von Mises, especialmente nas vigas Prot-Diam1 e Prot-Diam3, que possuem bordas mais críticas e menor resistência nas regiões próximas às aberturas. Isso evidencia a necessidade de uma configuração geométrica otimizada para minimizar os picos de tensões em vigas com alvéolos em formato de diamante.

A Tabela 6.35 mostra um aumento moderado nas tensões longitudinais (S11) nas vigas protendidas com alvéolos em formato de diamante, variando de 2% a 5% em relação à viga padrão (Prot-Padrão). A Prot-Diam1, com +2%, apresentou o melhor desempenho devido à sua maior altura (+49%), que compensou a perda de material.

As Prot-Diam2 e Prot-Diam3, ambas com +5%, registraram as maiores tensões longitudinais. Isso se deve à redução de peso (10% e 28%) e à menor altura no caso da Prot-Diam3, o que limitou sua capacidade de resistir aos esforços longitudinais. Esses resultados mostram que o aumento da altura e a manutenção do peso são essenciais para minimizar as tensões longitudinais em vigas com alvéolos diamantes.

A Tabela 6.36 mostra um aumento expressivo nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas protendidas com alvéolos diamantes, refletindo a concentração de esforços nas bordas das aberturas. A Prot-Diam1, com um aumento de 42%, registrou a maior tensão cisalhante devido à sua maior altura (+49%), que intensificou as tensões nas regiões próximas aos alvéolos.

As Prot-Diam2 e Prot-Diam3, com aumentos de 36% e 40%, respectivamente, apresentaram valores elevados, possivelmente devido à redução de peso (10% e 28%) e à menor altura, especialmente na Prot-Diam3.

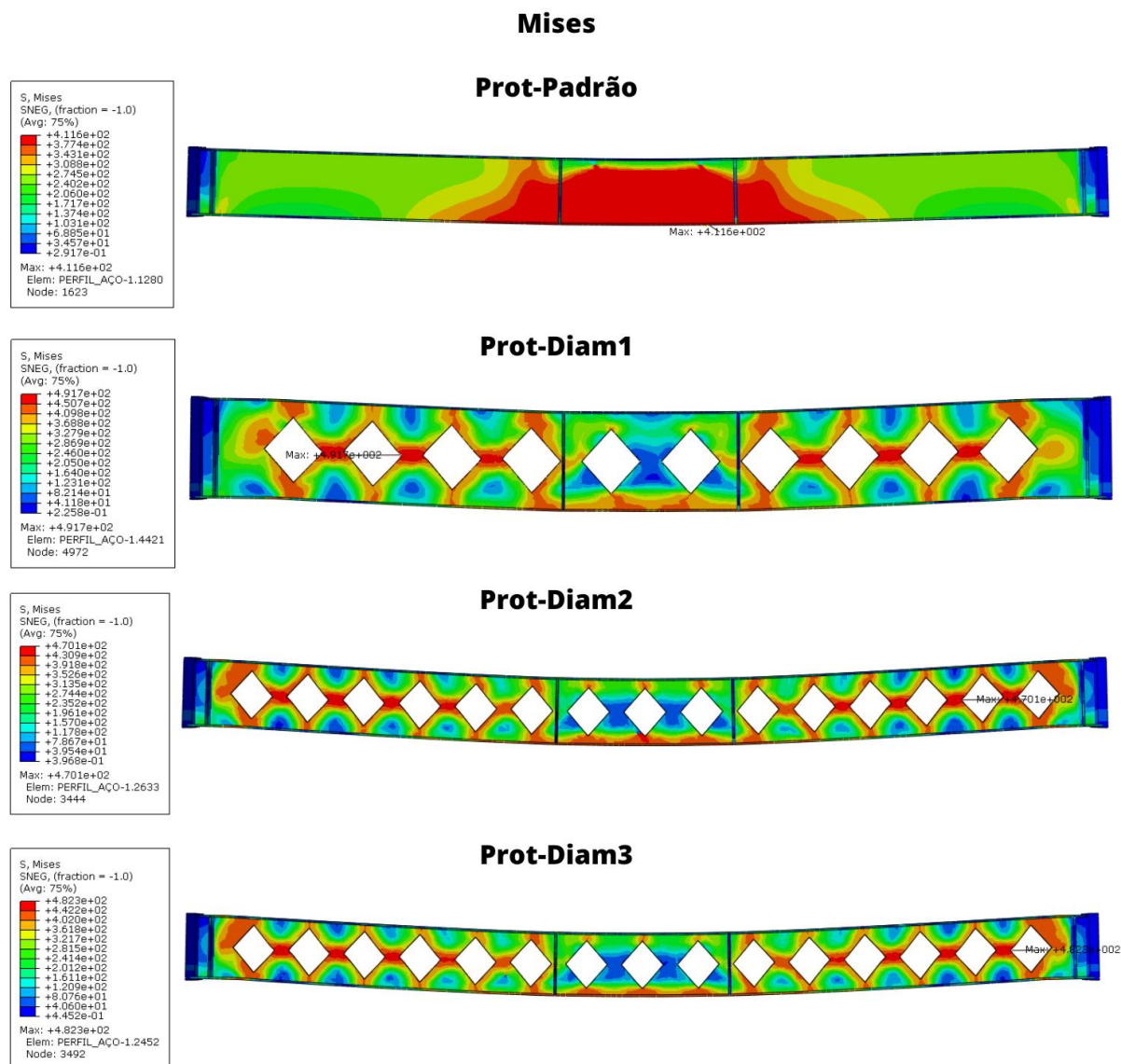


Figura 6.33 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

Tabela 6.34 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	411,6	-
21	Prot-Diam1	491,7	+19%
22	Prot-Diam2	470,1	+14%
23	Prot-Diam3	482,3	+17%

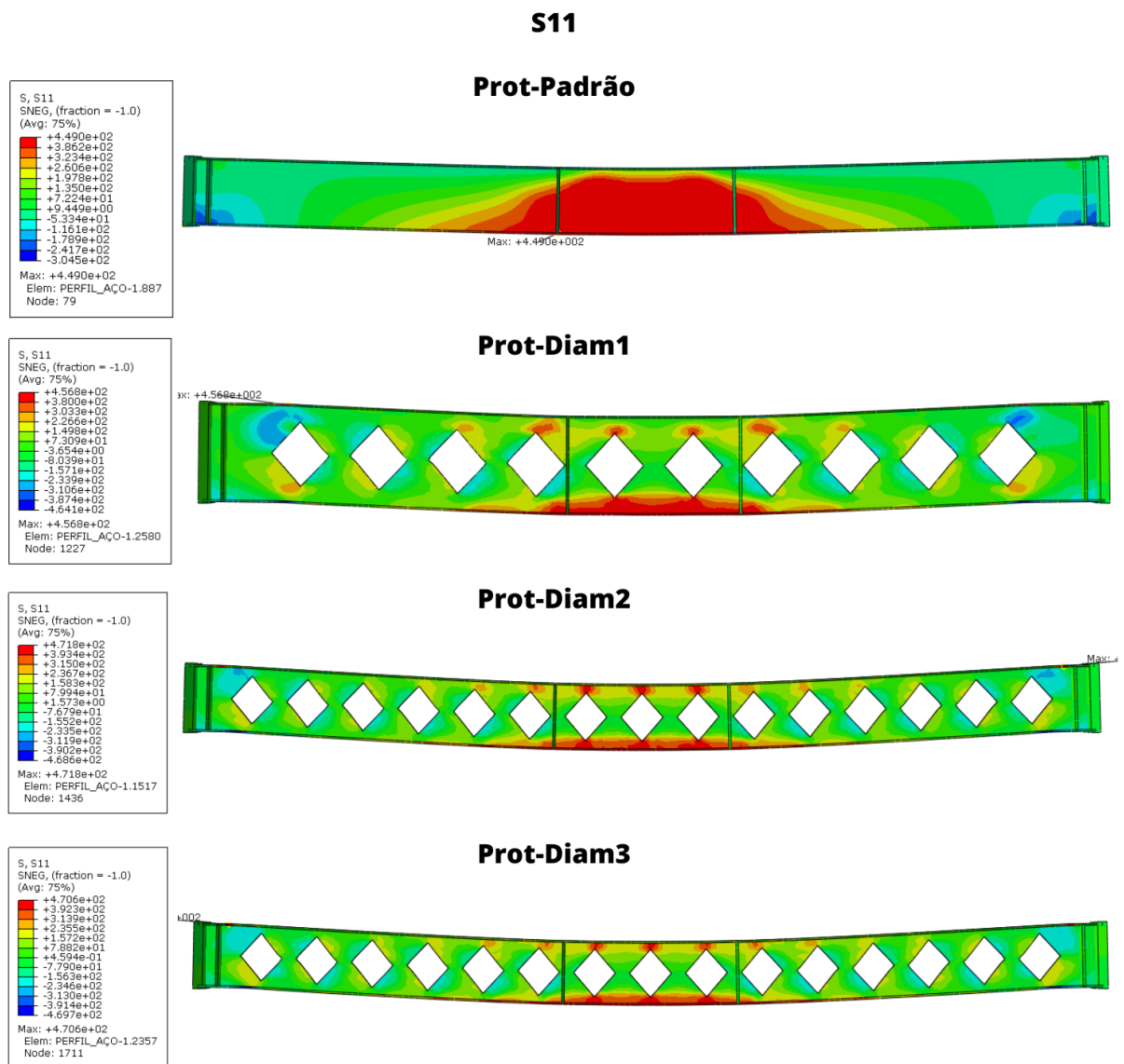


Figura 6.34 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

Tabela 6.35 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	449,0	-
21	Prot-Diam1	456,8	+2%
22	Prot-Diam2	471,8	+5%
23	Prot-Diam3	470,6	+5%



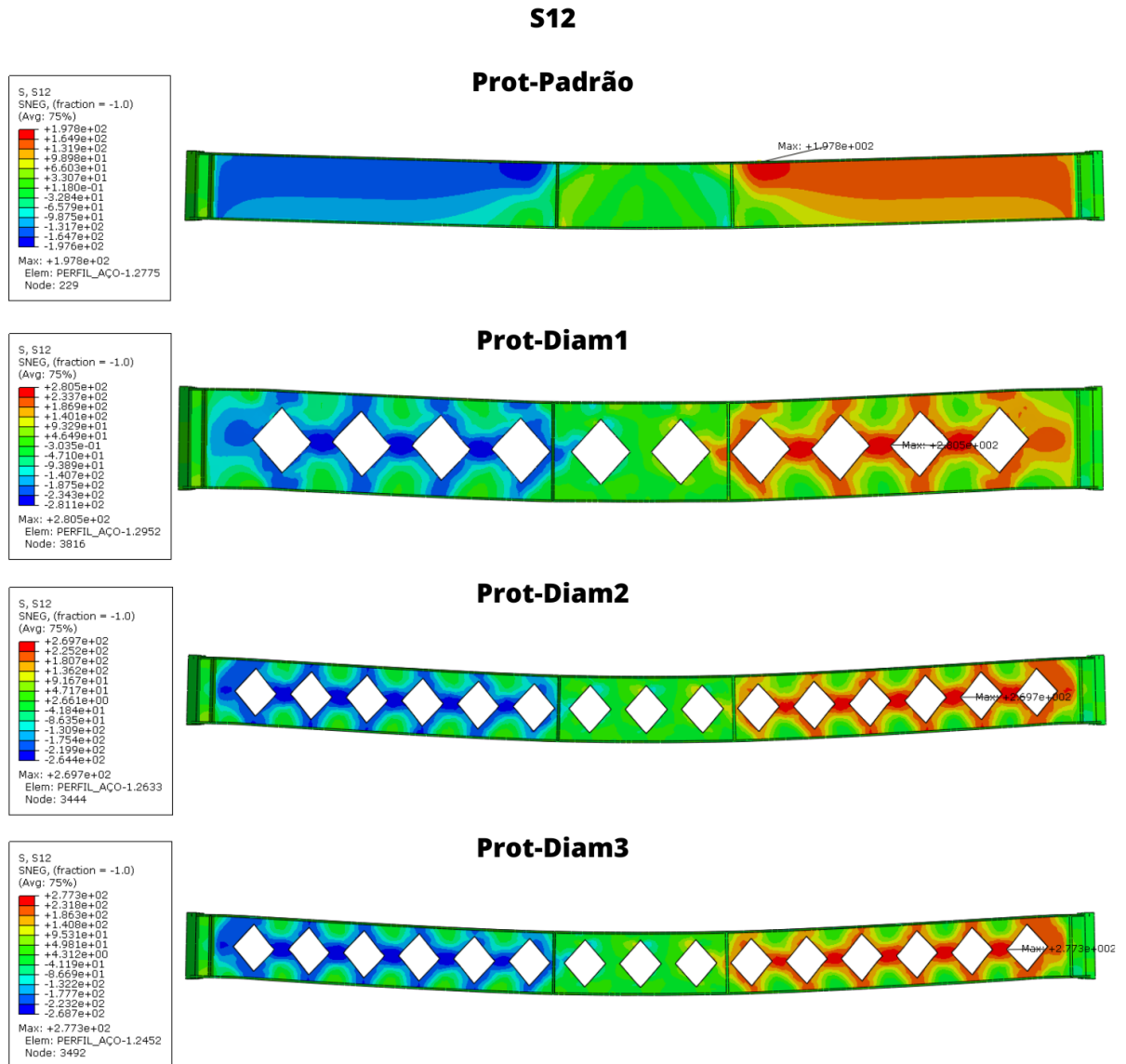


Figura 6.35 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

Tabela 6.36 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos diamantes.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	197,8	-
21	Prot-Diam1	280,5	+42%
22	Prot-Diam2	269,7	+36%
23	Prot-Diam3	277,3	+40%

#### 6.3.4 Alvéolos Retangulares

Para os alvéolos retangulares, foi feita a comparação das deflexões máximas e da carga aplicada na estrutura, conforme mostrado na Figura 6.36.

A Tabela 6.37Tabela 6.22 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas protendidas com alvéolos retangulares, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.38 exibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço com alvéolos retangulares.

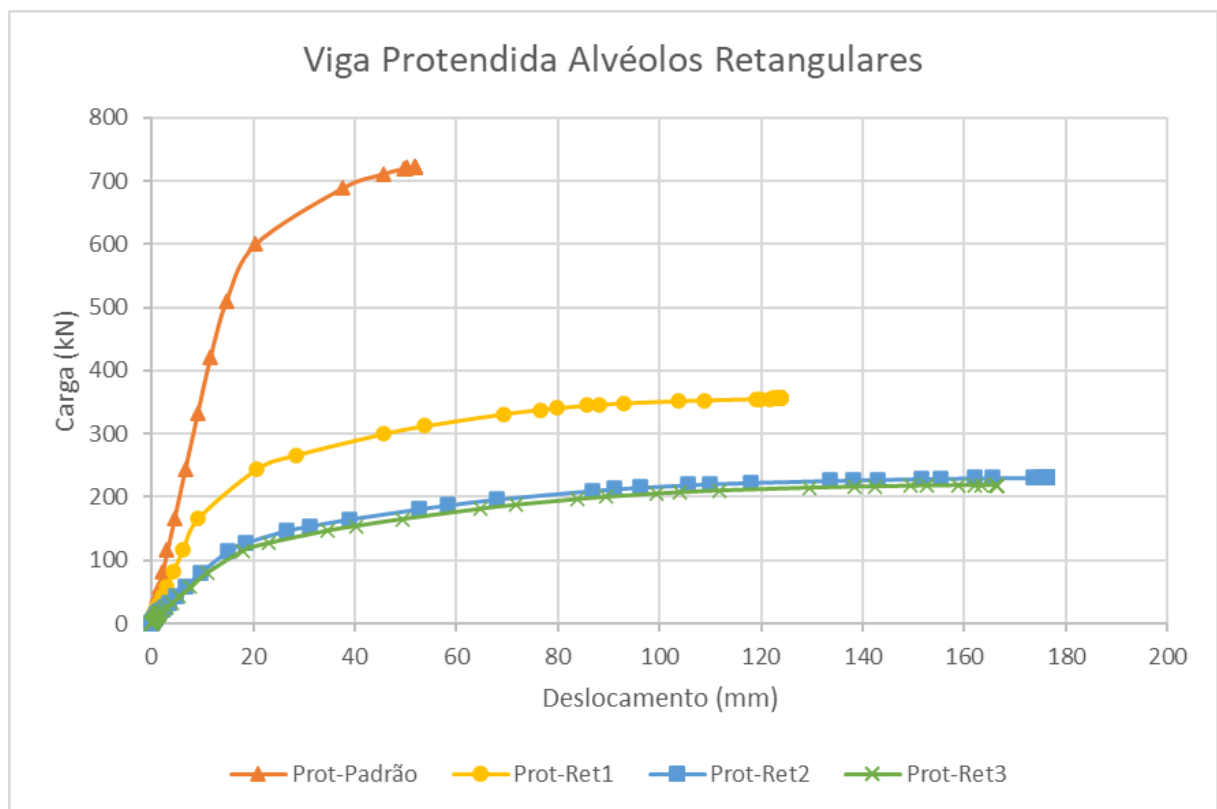


Figura 6.36 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos retangulares.

Tabela 6.37 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos retangulares.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
24	Prot-Ret1	123,91	+138,6%	355,70	-50,7%
25	Prot-Ret2	176,31	+239,5%	231,13	-68,0%
26	Prot-Ret3	166,26	+220,2%	218,99	-69,6%

Tabela 6.38 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos retangulares.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
14	Prot-Padrão	221,75	-	352	-
24	Prot-Ret1	215,08	-3%	525,2	+49%
25	Prot-Ret2	175,98	-21%	352	0,0%
26	Prot-Ret3	137,55	-38%	338,57	-4%

A análise das Tabelas 6.37 e 6.38 mostra um desempenho estrutural crítico nas vigas protendidas com alvéolos retangulares, evidenciado por grandes deslocamentos máximos e reduções expressivas nas cargas máximas aplicadas.

A Prot-Ret1, apesar de um aumento de 49% na altura e uma redução de apenas 3% no peso, registrou um deslocamento máximo 138,6% maior e uma redução de 50,7% na carga máxima suportada. Isso indica que, embora sua maior altura tenha melhorado a redistribuição de tensões, a geometria dos alvéolos retangulares gerou concentrações críticas de esforços nas bordas das aberturas, limitando sua eficiência.

A Prot-Ret2, com uma redução de 21% no peso e sem aumento de altura, apresentou um deslocamento máximo 239,5% maior e uma queda de 68% na carga máxima. Esses resultados evidenciam que a perda de material sem compensação geométrica comprometeu gravemente a rigidez e a resistência estrutural.

A Prot-Ret3, com uma redução de 38% no peso e 4% na altura, apresentou um desempenho ainda mais crítico, com um deslocamento máximo 220,2% maior e uma redução de 69,6% na carga máxima suportada. A combinação de altura e peso reduzidos resultou em uma perda severa de rigidez e resistência estrutural.

Logo, a geometria retangular dos alvéolos resultou em concentrações intensas de tensões nas bordas e nos vértices das aberturas, intensificando deslocamentos e reduzindo drasticamente a capacidade de carga das vigas. Mesmo com o aumento de altura na Prot-Ret1, sua eficiência foi limitada, enquanto as vigas Prot-Ret2 e Prot-Ret3, com menor altura e maior perda de material, apresentaram um comportamento estrutural insatisfatório. Esses resultados reforçam a necessidade de um projeto geométrico otimizado e de reforços estruturais adicionais para minimizar falhas em vigas com alvéolos retangulares.

As Figura 6.37, 6.38, e 6.39 juntamente com as Tabela 6.39, 6.40, e 6.41 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

A Tabela 6.39 mostra um aumento moderado nas tensões máximas de Von Mises nas vigas protendidas com alvéolos retangulares, refletindo a concentração de esforços ao redor das bordas vivas das aberturas.

A Prot-Ret1, com um aumento de 15%, apresentou a maior tensão de Von Mises devido ao seu aumento de 49% na altura e à presença de alvéolos retangulares que geram concentrações de tensões significativas nos cantos das aberturas. Apesar do aumento na altura, a geometria dos alvéolos limitou sua eficiência estrutural, contribuindo para picos de tensões.

A Prot-Ret2, com uma redução de 21% no peso e sem aumento de altura, registrou uma elevação de 13% nas tensões de Von Mises. A Prot-Ret3, com 38% de redução no peso e 4% de diminuição na altura, apresentou o menor aumento nas tensões de Von Mises (10%), mas isso é atribuído à sua menor resistência global, o que resultou em uma falha estrutural precoce, antes que tensões mais elevadas fossem alcançadas.

A presença de alvéolos retangulares intensificou as tensões de Von Mises devido às bordas vivas e vértices pronunciados das aberturas. A Prot-Ret1, apesar do aumento de altura, registrou os maiores picos de tensão devido à sua maior área exposta. As vigas Prot-Ret2 e Prot-Ret3,

com menor altura e peso, também apresentaram tensões elevadas, reforçando a necessidade de compensação geométrica e reforços estruturais em perfis com alvéolos retangulares.

A Tabela 6.40 mostra um aumento moderado nas tensões longitudinais (S11) nas vigas protendidas com alvéolos retangulares, variando de 5% a 7%, devido à redistribuição de esforços causada pela presença das aberturas. A Prot-Ret1, com um aumento de 7%, apresentou a maior tensão longitudinal, refletindo sua maior altura (+49%), que compensou parcialmente a perda de material, mas ainda concentrou tensões nas bordas dos alvéolos.

As Prot-Ret2 e Prot-Ret3, com reduções significativas de peso (-21% e -38%) e menor altura no caso da Prot-Ret3, registraram aumentos de 6% e 5%, respectivamente. Isso indica que a menor inércia estrutural devido à redução de material resultou em tensões mais elevadas ao longo da seção.

A Tabela 6.41 mostra um aumento nas tensões cisalhantes (S12) nas vigas protendidas com alvéolos retangulares, variando entre 13% e 20%, devido à concentração de esforços nas bordas vivas das aberturas.

A Prot-Ret1, apesar de seu aumento de 49% na altura, registrou um aumento de 14% nas tensões cisalhantes, indicando que a maior altura ajudou a redistribuir os esforços, mas não foi suficiente para eliminar as concentrações nas bordas dos alvéolos.

A Prot-Ret2, com uma redução de 21% no peso e sem aumento de altura, apresentou o maior aumento (20%) nas tensões cisalhantes. Isso se deve à perda de material e à falta de compensação geométrica, intensificando os esforços ao redor das aberturas.

A Prot-Ret3, com uma redução de 38% no peso e 4% na altura, apresentou um aumento de 13%, um pouco inferior ao da Prot-Ret1. Isso sugere que sua menor resistência geral limitou sua capacidade de suportar tensões elevadas antes da falha.

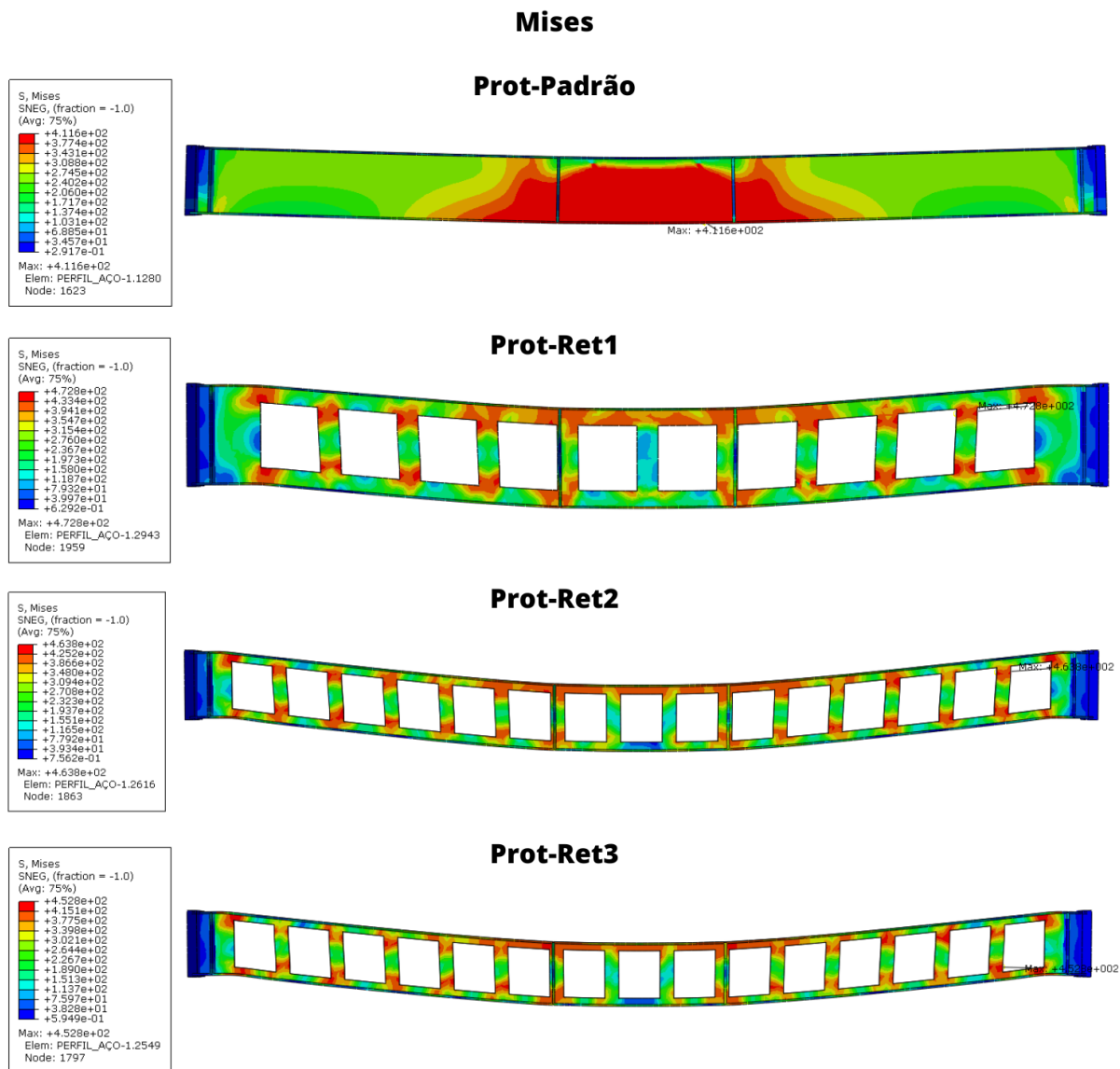


Figura 6.37 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

Tabela 6.39 - Comparação da tensão Von Mises máxima [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

	Viga	Von Mises	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	411,6	-
24	Prot-Ret1	472,8	+15%
25	Prot-Ret2	463,8	+13%
26	Prot-Ret3	452,8	+10%

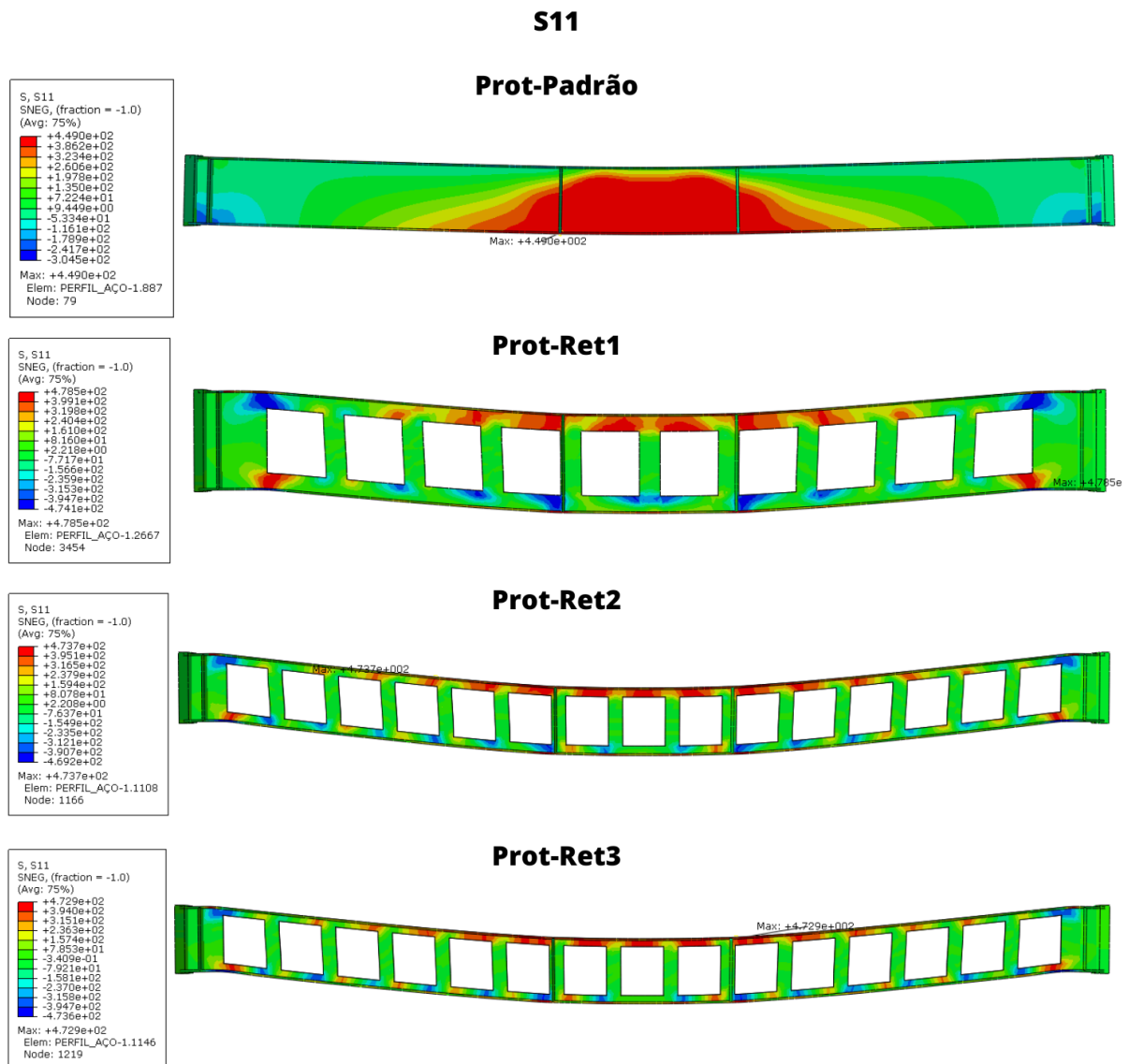


Figura 6.38 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

Tabela 6.40 - Comparação da tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

	Viga	Tensão longitudinal (S11)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	449,0	-
24	Prot-Ret1	478,5	+7%
25	Prot-Ret2	473,7	+6%
26	Prot-Ret3	472,9	+5%

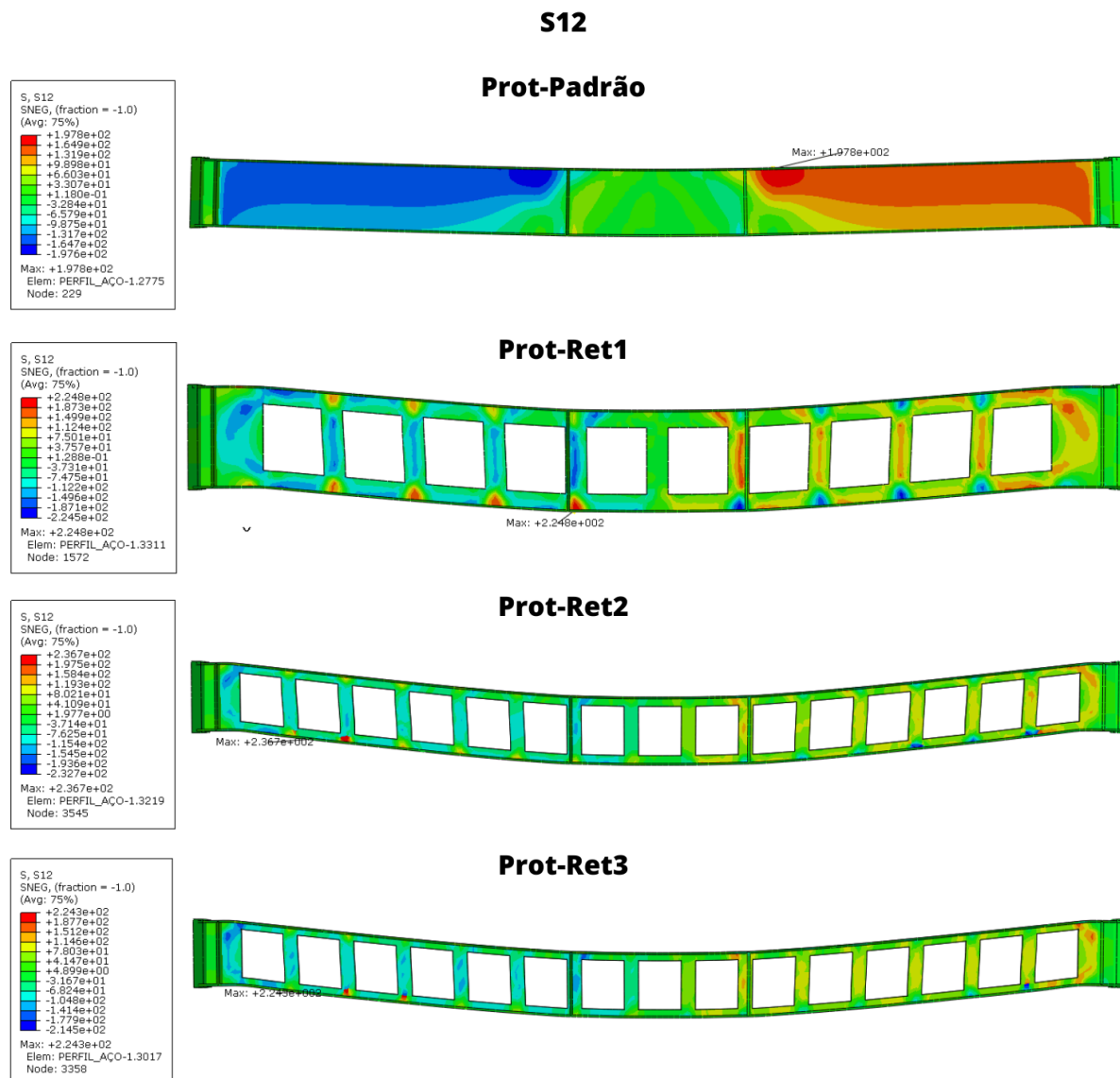


Figura 6.39 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

Tabela 6.41 - Comparação da tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos retangulares.

	Viga	Tensão cisalhante (S12)	Comparação com padrão
14	Prot-Padrão	197,8	-
24	Prot-Ret1	224,8	+14%
25	Prot-Ret2	236,7	+20%
26	Prot-Ret3	224,3	+13%



### 6.3.5 Alvéolos Variados

A geometria dos alvéolos em vigas mistas tem um impacto direto no comportamento estrutural dessas peças, influenciando parâmetros como rigidez, capacidade de carga, distribuição de tensões e deslocamentos máximos. Para entender essa relação, este tópico apresenta uma comparação detalhada entre diferentes formatos de alvéolos aplicados a vigas mistas protendidas, utilizando uma configuração comum denominada Tipo 1, onde o perfil padrão é acastelado aumentando a sua altura original, mantendo suas dimensões principais e adicionando alvéolos.

São analisados quatro formatos de alvéolos principais: circulares, hexagonais, diamantes e retangulares, avaliando seus impactos no desempenho global das vigas mistas protendidas. A aplicação dos alvéolos visa à redução de peso e ao aproveitamento estrutural mais eficiente, mas também pode gerar concentrações de tensões e perdas de rigidez, especialmente em regiões próximas às aberturas.

A comparação é realizada com base em parâmetros fundamentais, como cargas máximas suportadas e deslocamentos máximos (Figura 6.40), tensões de Von Mises, tensões longitudinais ( $S_{11}$ ) e tensões cisalhantes ( $S_{12}$ ). A viga padrão é usada como referência, permitindo identificar as vantagens e limitações de cada geometria de alvéolo, destacando suas aplicações mais apropriadas e recomendações de melhoria. Com essa abordagem, busca-se fornecer uma visão abrangente sobre o impacto estrutural da geometria dos alvéolos nas Vigas Mistas Alveolares Protendidas (ViMAP), contribuindo para o projeto otimizado de estruturas mistas aço-concreto.

A Tabela 6.42 apresenta os deslocamentos máximos e as cargas máximas aplicadas nas vigas protendidas com alvéolos variados, comparando esses resultados com os da viga sem alvéolos. A Tabela 6.43 exhibe os valores correspondentes aos pesos e às alturas finais dos perfis de aço.

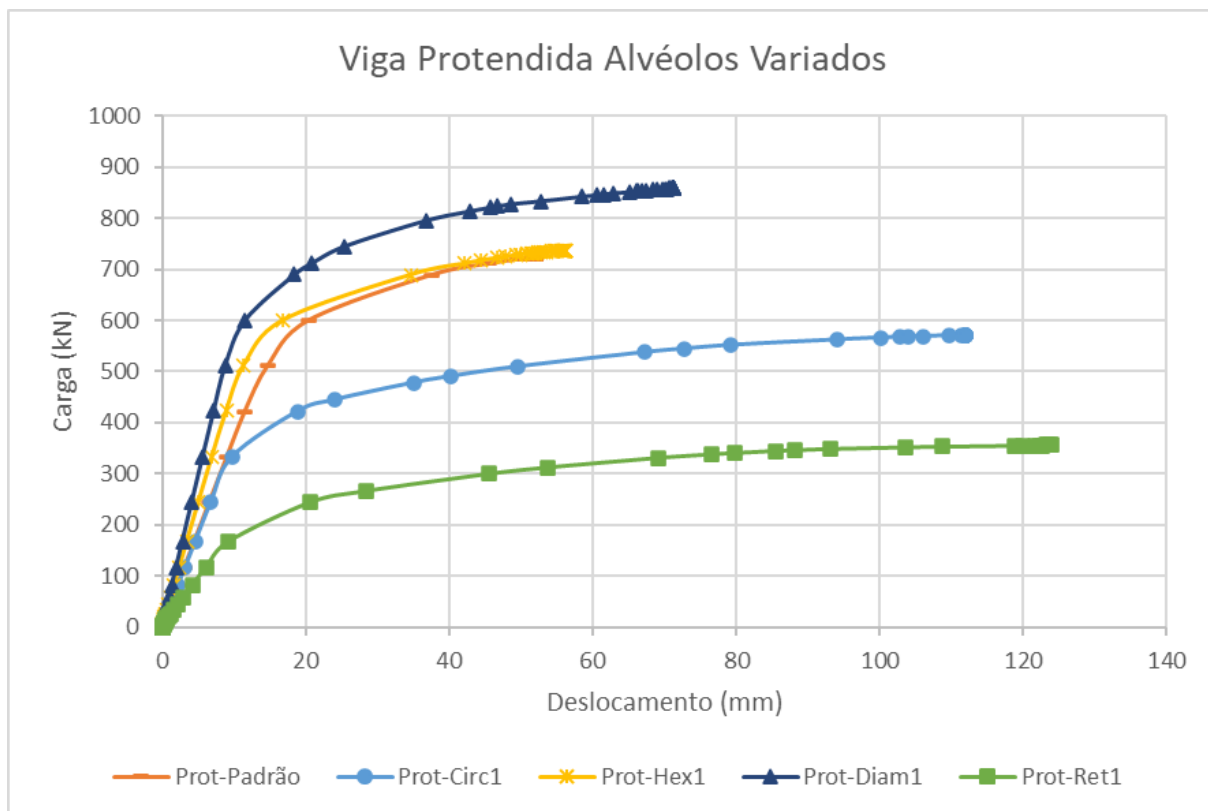


Figura 6.40 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos variados.

Tabela 6.42 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] para vigas protendidas com alvéolos variados.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	Comparação	Carga Máxima (kN)	Comparação
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
15	Prot-Circ1	112,04	+115,7%	570,77	-20,9%
18	Prot-Hex1	56,23	+8,3%	737,09	+2,2%
21	Prot-Diam1	71,27	+37,3%	858,15	+19,0%
24	Prot-Ret1	123,91	+138,6%	355,70	-50,7%

Tabela 6.43 - Comparação do peso [kg] e altura total [mm] do perfil de aço com alvéolos variados.

	Viga	Peso [kg]	Comparação	Altura [mm]	Comparação
14	Prot-Padrão	221,75	-	352	-
15	Prot-Circ1	221,04	-0,3%	519,7	+48%
18	Prot-Hex1	233,57	+5%	525,2	+49%
21	Prot-Diam1	243,74	+10%	525,2	+49%
24	Prot-Ret1	215,08	-3%	525,2	+49%

A análise das Tabela 6.42 e 6.43 evidencia o desempenho estrutural das vigas mistas protendidas com diferentes alvéolos, considerando deslocamento máximo, carga máxima suportada, peso e altura total dos perfis. Os resultados mostram como a geometria das aberturas afeta significativamente a rigidez, a capacidade de carga e a distribuição de esforços nas vigas.

Ao analisar o deslocamento máximo (U2), a Prot-Hex1, com alvéolos hexagonais, apresentou o menor deslocamento, registrando apenas 8,3% a mais que a viga padrão. Isso demonstra uma redistribuição eficiente de esforços, justificada pelo aumento de 49% na altura e 5% no peso, que compensaram a perda de material. A Prot-Diam1, com alvéolos em formato de diamante, registrou um deslocamento 37,3% maior, também beneficiando-se do aumento de 49% na altura e 10% no peso, embora a presença de vértices agudos tenha gerado concentrações de tensões. Em contraste, a Prot-Circ1, mesmo apresentando uma altura elevada (+48%) e peso próximo ao da viga padrão, teve um deslocamento 115,7% maior, mostrando que a menor inércia resultante dos alvéolos circulares comprometeu sua rigidez. A Prot-Ret1, com alvéolos retangulares, registrou o maior deslocamento (138,6%), refletindo grave perda de rigidez estrutural causada pelas bordas vivas e vértices críticos das aberturas, mesmo com o aumento de 49% na altura.

Em relação à carga máxima suportada, a Prot-Diam1 se destacou, suportando 858,15 kN (+19%), o maior valor registrado. Isso demonstra que sua maior altura e peso permitiram uma redistribuição eficaz dos esforços, mesmo com tensões concentradas nas bordas. A Prot-Hex1, com uma carga máxima de 737,09 kN (+2,2%), também apresentou um desempenho positivo devido ao seu aumento de 49% na altura, resultando em uma boa eficiência estrutural. Por outro lado, a Prot-Circ1, apesar de sua altura aumentada (+48%), apresentou uma redução de 20,9%

na carga máxima suportada, evidenciando que sua geometria, embora eficiente na mitigação de tensões, foi prejudicada pela menor área resistente nas seções alveoladas. A Prot-Ret1, novamente, registrou o pior desempenho, suportando apenas 355,70 kN (-50,7%), uma redução crítica de capacidade de carga atribuída às concentrações de tensões nas bordas vivas das aberturas retangulares.

A análise do peso e da altura total dos perfis explica parte das diferenças observadas nos resultados. A Prot-Diam1, com um peso de 243,74 kg (+10%) e um aumento de 49% na altura, mostrou o melhor desempenho global, suportando a maior carga máxima e apresentando um deslocamento moderado. A Prot-Hex1, com 233,57 kg (+5%) e altura aumentada em 49%, apresentou resultados equilibrados, demonstrando uma boa compensação estrutural. Em contraste, a Prot-Circ1, com um peso próximo ao da viga padrão (-0,3%), apresentou resultados aquém do esperado, sugerindo que a geometria circular não proporcionou uma redistribuição de esforços eficaz. Por fim, a Prot-Ret1, com o menor peso (215,08 kg, -3%), registrou grandes deslocamentos e baixa capacidade de carga, reforçando que o formato retangular das aberturas gera concentrações de tensões críticas.

Em síntese, a análise evidencia que o formato dos alvéolos exerce uma influência determinante no desempenho estrutural das vigas mistas protendidas. A Prot-Diam1, devido à sua maior altura e peso, apresentou o melhor desempenho global, combinando alta capacidade de carga e deslocamento moderado. A Prot-Hex1 mostrou-se uma opção eficiente, apresentando bons resultados estruturais devido à sua geometria equilibrada. Por outro lado, a Prot-Circ1, apesar de sua altura aumentada, apresentou perdas significativas de rigidez e carga máxima, enquanto a Prot-Ret1 demonstrou o pior desempenho, com grandes deslocamentos e baixa capacidade de carga, destacando a necessidade de reforços estruturais e ajustes geométricos para viabilizar seu uso em projetos estruturais.

#### 6.4 VARIAÇÃO DO TAMANHO DOS ALVÉOLOS NA ViMAP

A geometria e o tamanho dos alvéolos têm um impacto direto no desempenho estrutural das vigas mistas protendidas, influenciando parâmetros como rigidez, capacidade de carga, tensões máximas e peso final. Nesta análise, foram selecionadas as vigas do tipo 2, que possuem a

mesma altura total do perfil padrão, mas diferem na geometria dos alvéolos. A partir dessas vigas, foi realizada uma redução progressiva do tamanho dos alvéolos, ajustando-os para 75% e 50% da altura original das aberturas, enquanto a altura final da viga permaneceu inalterada.

Nessa etapa da análise, optou-se por não adotar o processo de acastelamento do perfil, uma vez que tal procedimento exige proporções específicas entre a altura e o espaçamento dos alvéolos, o que implicaria em alterações geométricas adicionais. O objetivo desta investigação foi isolar exclusivamente o efeito do tamanho dos furos sobre o comportamento estrutural das vigas, mantendo-se constante a distância entre os centros dos alvéolos, de modo a garantir a clareza na interpretação dos resultados.

Essa redução no tamanho dos alvéolos implica em um aumento do peso total da viga, uma vez que áreas previamente vazadas são substituídas por material estrutural. O aumento do peso tende a proporcionar maior rigidez estrutural e menor concentração de tensões ao redor das aberturas, porém, pode impactar negativamente na eficiência em termos de otimização de material.

Espera-se que a redução no tamanho dos alvéolos mitigue concentrações críticas de tensões, reduza deslocamentos excessivos e melhore a capacidade de carga, fornecendo insights para o projeto otimizado de vigas mistas com alvéolos de diferentes geometrias e tamanhos.

Na Tabela 6.56 está indicada as nomenclaturas das vigas modeladas, e as dimensões das vigas foram especificadas nas Figura 6.41 e Figura 6.42.

Tabela 6.44 -Indicação das vigas modeladas variando o tamanho dos alvéolos.			
<b>Formato</b>	<b>Tradicional</b>	<b>75%</b>	<b>50%</b>
Padrão	Prot-Padrão		
Círculo 2	Prot-Circ2-100%	Prot-Circ2-75%	Prot-Circ2-50%
Hexágono 2	Prot-Hex2-100%	Prot-Hex2-75%	Prot-Hex2-50%
Diamante 2	Prot-Diam2-100%	Prot-Diam2-75%	Prot-Diam2-50%
Retângulo 2	Prot-Ret2-100%	Prot-Ret2-75%	Prot-Ret2-50%

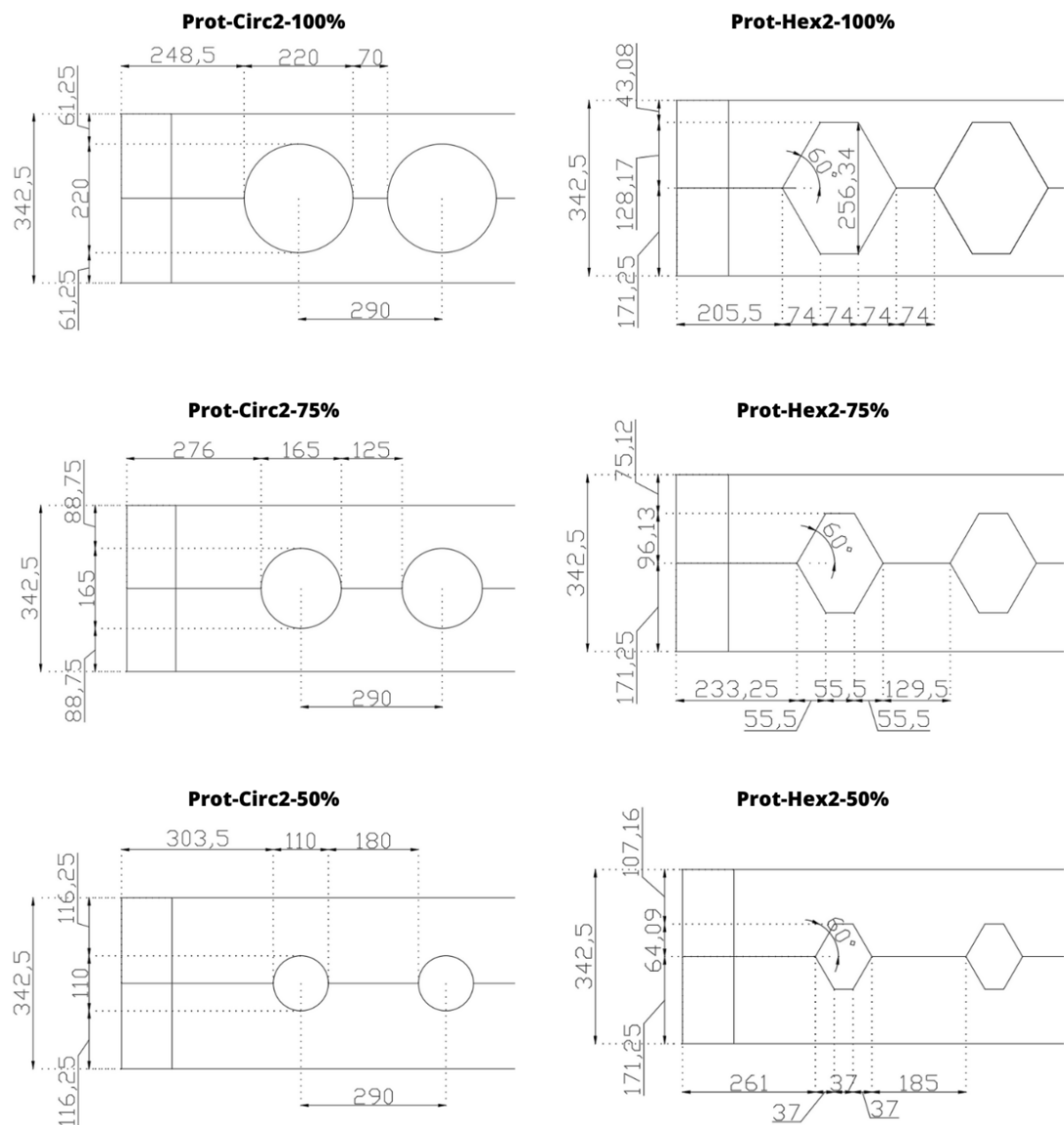


Figura 6.41 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e hexagonais reduzidos.

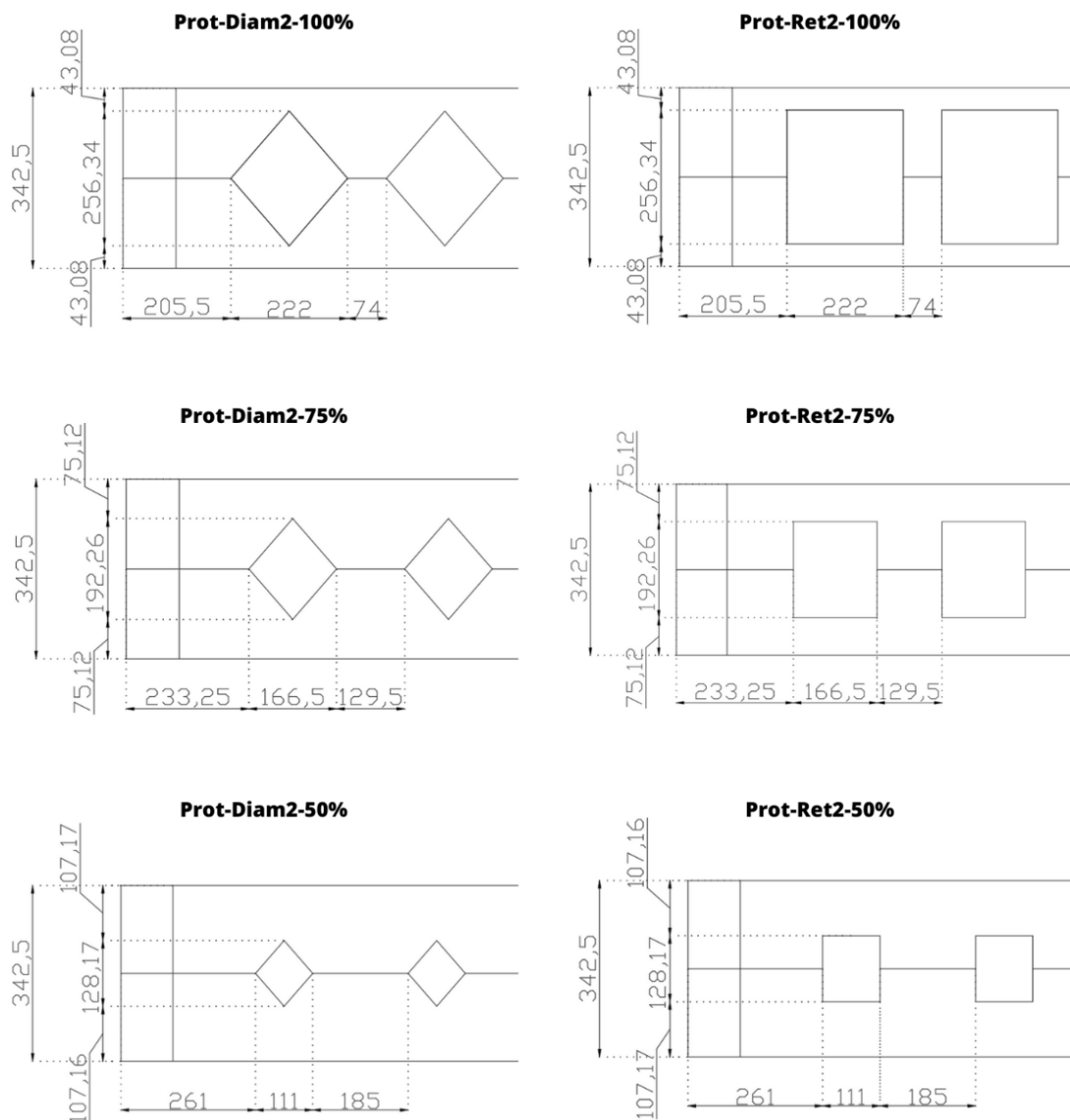


Figura 6.42 - Dimensões das vigas com alvéolos diamantes e retangulares reduzidos.

#### 6.4.1 Alvéolos com tamanho 100%

Neste subtópico, são analisadas as vigas mistas protendidas com alvéolos de tamanho correspondente a 100% da altura padrão das aberturas, mantendo-se constantes a altura final das vigas e variando apenas a geometria dos alvéolos: circulares, hexagonais, diamantes e retangulares.

Essa configuração representa a aplicação direta das geometrias alveolares sem qualquer redução proporcional nas dimensões das aberturas, permitindo avaliar o impacto inicial de cada formato no desempenho estrutural global das vigas.

A comparação será conduzida com base em parâmetros como curva deslocamento máximo e carga máxima suportada (Figura 6.43), peso total do perfil (Tabela 6.45), e as tensões de Von Mises, tensões longitudinais (S11) e cisalhantes (S12).

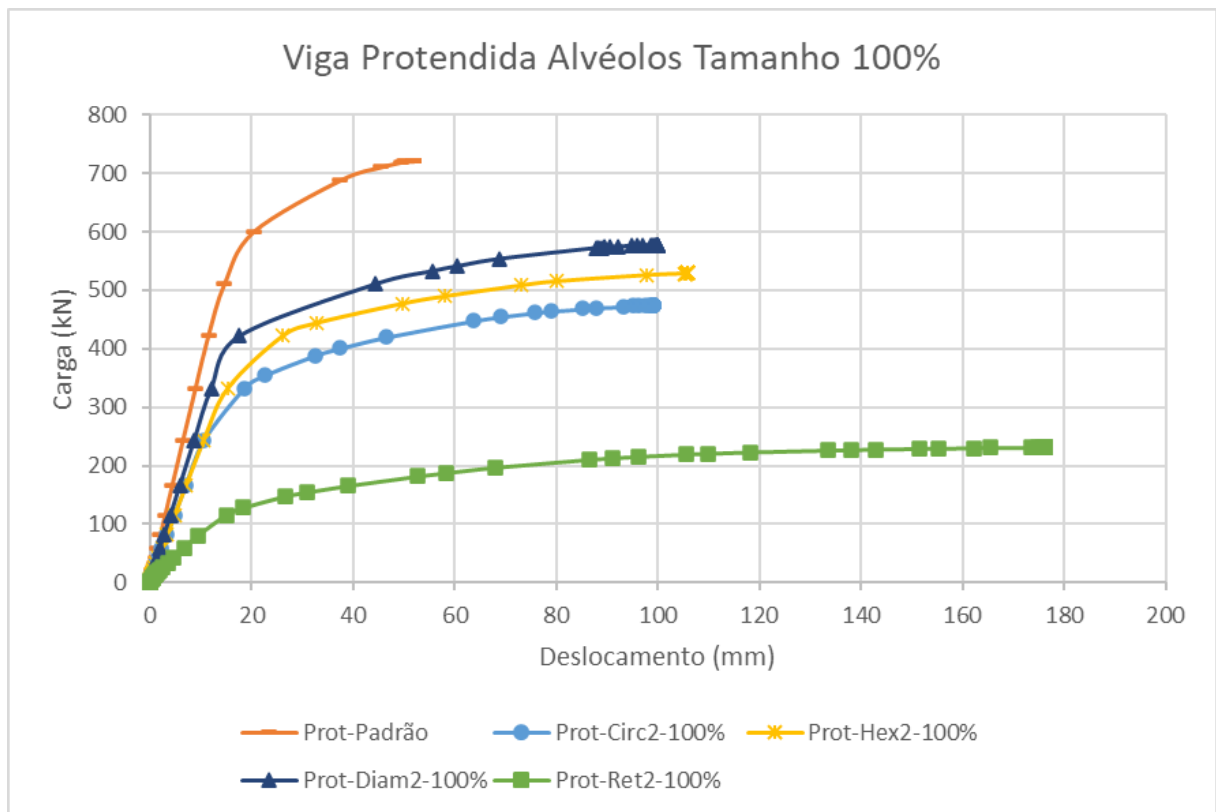


Figura 6.43 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 100%.



Tabela 6.45 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 100%.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%	Peso [kg]	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-	221,75	-
27	Prot-Circ2-100%	99,17	+91,0%	474,19	-34,2%	191,11	-13,8%
28	Prot-Hex2-100%	105,75	+103,6%	529,05	-26,6%	191,17	-14%
29	Prot-Diam2-100%	99,83	+92,2%	577,84	-19,9%	198,76	-10%
30	Prot-Ret2-100%	176,31	+239,5%	231,13	-68,0%	175,98	-21%

A análise dos dados apresentados na Tabela 6.45 revela como o formato dos alvéolos influencia diretamente o desempenho estrutural das vigas mistas protendidas. As vigas analisadas foram submetidas às mesmas condições de altura, com variações apenas na geometria das aberturas, evidenciando o impacto dessa escolha no comportamento estrutural.

No que diz respeito ao deslocamento máximo, observa-se que as vigas com alvéolos circulares (Prot-Circ2-100%) e hexagonais (Prot-Hex2-100%) apresentaram deslocamentos elevados, de 99,17 mm (91%) e 105,75 mm (103,6%), respectivamente. O desempenho da Prot-Circ2-100%, apesar da geometria circular reduzir picos de tensões nas bordas, foi prejudicado pela redução de 13,8% no peso, o que resultou em menor rigidez global. Já a Prot-Hex2-100%, mesmo com uma leve diferença no peso total (-14%), apresentou um deslocamento ainda mais significativo, sugerindo que os vértices e bordas dos alvéolos hexagonais contribuíram para um comportamento menos estável sob carregamento.

Em contraste, a Prot-Diam2-100%, com deslocamento de 99,83 mm (92,2%), apresentou um desempenho ligeiramente melhor que a Prot-Hex2, graças ao peso mais equilibrado (-10%) e a uma distribuição mais eficiente das tensões longitudinais. No entanto, a Prot-Ret2-100% exibiu um deslocamento alarmante de 176,31 mm (239,5%), indicando uma perda severa de rigidez estrutural devido à combinação de redução de peso (-21%) e à geometria das aberturas retangulares, que favoreceram a formação de pontos críticos de tensão e deformação.

Quanto à carga máxima suportada, o impacto do formato dos alvéolos também foi bastante significativo. A viga Prot-Diam2-100% apresentou a maior capacidade de carga entre as opções alveoladas, suportando 577,84 kN (-19,9%), desempenho atribuído ao seu peso mais elevado (-

10%) e à distribuição mais uniforme dos esforços longitudinais. A Prot-Hex2-100%, por sua vez, suportou 529,05 kN (-26,6%), ficando atrás da Prot-Diam2 devido à concentração de tensões nas bordas dos alvéolos hexagonais.

A Prot-Circ2-100% apresentou uma capacidade de carga reduzida, de apenas 474,19 kN (-34,2%), indicando que, embora as bordas suaves dos alvéolos circulares reduzam as tensões localizadas, a perda de material comprometeu significativamente a resistência global. Por fim, a Prot-Ret2-100% apresentou o pior desempenho, suportando apenas 231,13 kN (-68,0%), refletindo não apenas a perda de material, mas também a concentração crítica de tensões nas bordas e vértices das aberturas retangulares.

A Tabela 6.46 e as Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

Em relação às tensões Von Mises, todas as vigas com alvéolos apresentaram aumentos significativos em comparação com a viga padrão. A Prot-Hex2-100% registrou o maior aumento (14%), alcançando um valor de 470,1 MPa. Esse comportamento é justificado pelas bordas vivas dos alvéolos hexagonais, que geram concentrações elevadas de tensão. A Prot-Ret2-100%, com um aumento de 13% (463,8 MPa), também apresentou um desempenho crítico, devido às concentrações mais intensas nos vértices das aberturas retangulares. Já as vigas Prot-Circ2-100% (458,5 MPa, +11%) e Prot-Diam2-100% (455,8 MPa, +11%) registraram aumentos menores, com as aberturas circulares e diamantes apresentando uma distribuição um pouco mais uniforme das tensões ao longo das seções alveoladas.

Nas tensões longitudinais (S11), os aumentos foram mais moderados, variando entre 5% e 6%. As vigas Prot-Circ2-100% (474,4 MPa, +6%) e Prot-Ret2-100% (473,7 MPa, +6%) apresentaram os maiores valores, sugerindo que suas geometrias permitiram uma redistribuição mais eficiente das tensões longitudinais ao longo do eixo da viga. Já as vigas Prot-Hex2-100% (471,8 MPa, +5%) e Prot-Diam2-100% (472,7 MPa, +5%) apresentaram aumentos ligeiramente inferiores, mas ainda indicam uma redistribuição estável dos esforços longitudinais.

Nas tensões cisalhantes (S12), as diferenças entre os formatos dos alvéolos são mais evidentes. A Prot-Hex2-100% apresentou o maior aumento, com um acréscimo de 36% (269,7 MPa), refletindo a concentração crítica de tensões nas bordas das aberturas hexagonais. A Prot-Diam2-

100% (255,6 MPa, +29%) e a Prot-Circ2-100% (247,1 MPa, +25%) também registraram aumentos expressivos, mas ligeiramente inferiores, graças à geometria mais suave dos alvéolos. Por outro lado, a Prot-Ret2-100% apresentou o menor aumento entre as vigas alveoladas, com 20% (236,7 MPa). Esse comportamento pode ser atribuído ao colapso prematuro da viga, que limita o desenvolvimento de tensões cisalhantes mais elevadas antes da falha estrutural.

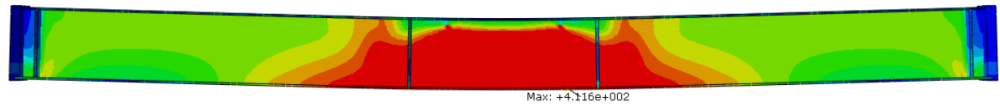
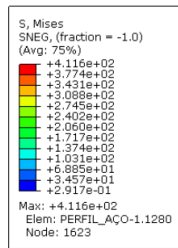
Em conclusão, as tensões Von Mises e cisalhantes foram mais sensíveis às variações geométricas dos alvéolos, com valores mais críticos observados nas vigas Prot-Hex2-100% e Prot-Ret2-100%. As tensões longitudinais (S11), por sua vez, permaneceram mais estáveis entre as diferentes configurações, com aumentos moderados em todas as vigas alveoladas. Esses resultados reforçam que a geometria dos alvéolos desempenha um papel fundamental na redistribuição de tensões, sendo necessário um cuidado especial no projeto de vigas com aberturas hexagonais e retangulares para evitar concentrações excessivas que possam comprometer a integridade estrutural.

Tabela 6.46 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%.

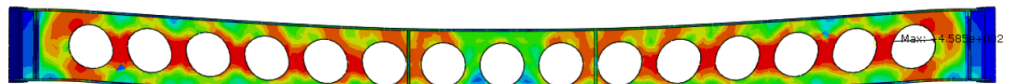
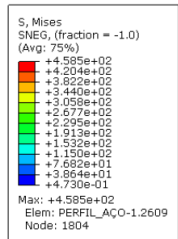
	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
27	Prot-Circ2-100%	458,5	+11%	474,4	+6%	247,1	+25%
28	Prot-Hex2-100%	470,1	+14%	471,8	+5%	269,7	+36%
29	Prot-Diam2-100%	455,8	+11%	472,7	+5%	255,6	+29%
30	Prot-Ret2-100%	463,8	+13%	473,7	+6%	236,7	+20%

## Mises

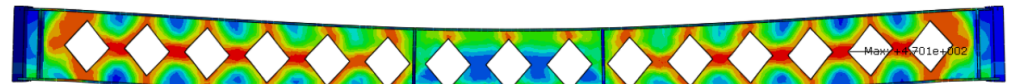
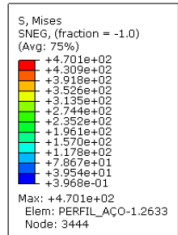
### Prot-Padrão



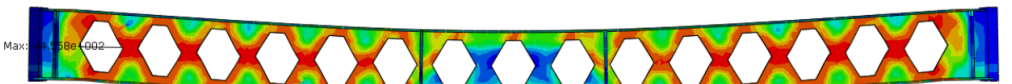
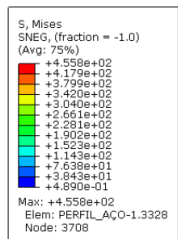
### Prot-Circ2-100%



### Prot-Diam2-100%



### Prot-Hex2-100%



### Prot-Ret2-100%

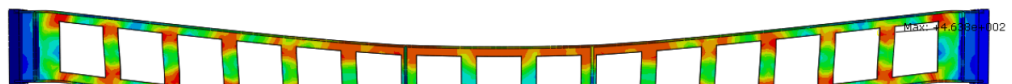
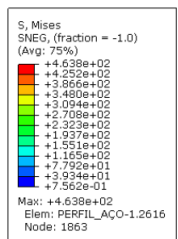


Figura 6.44 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%.

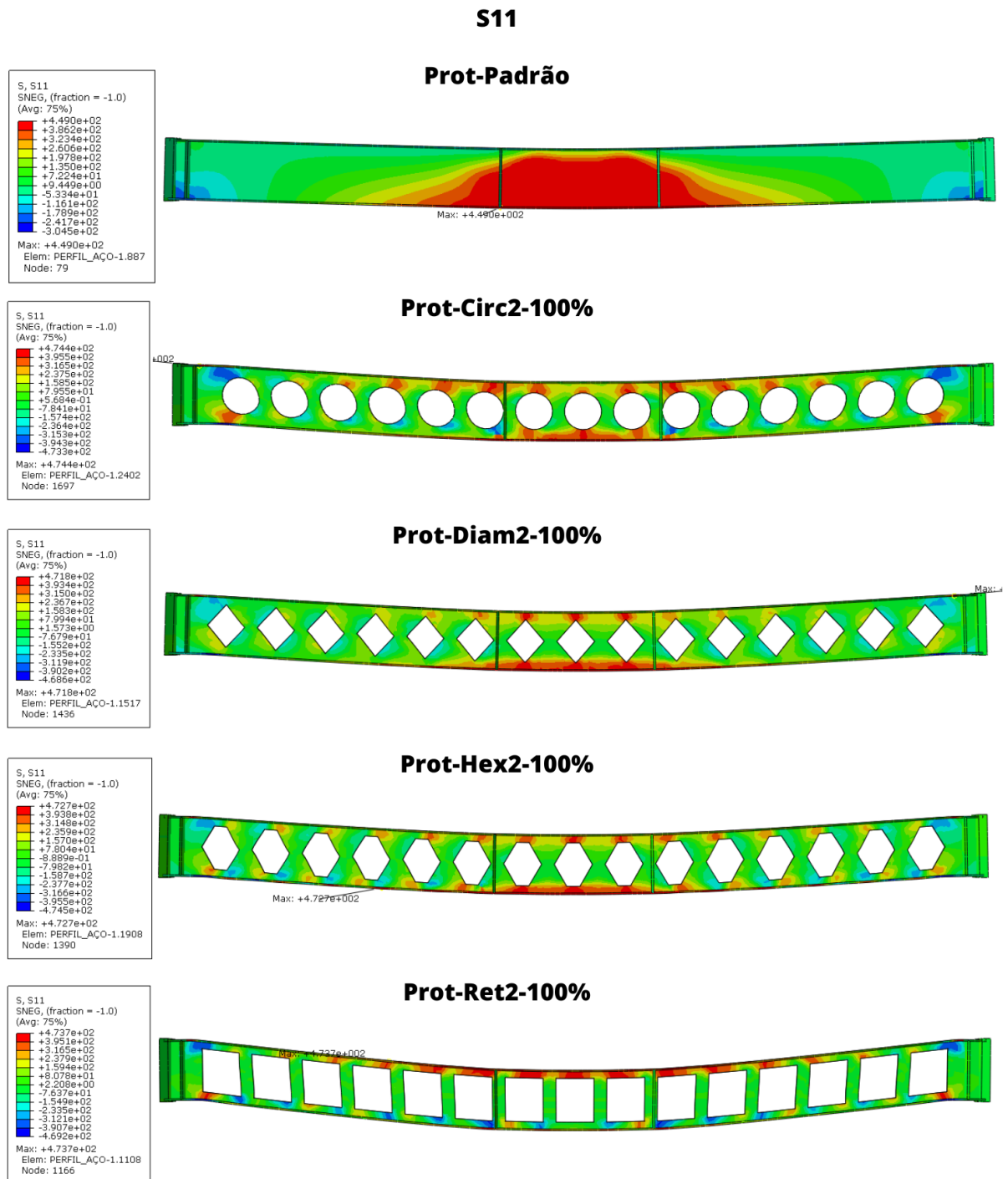
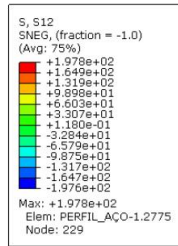


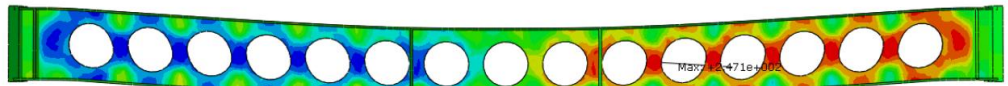
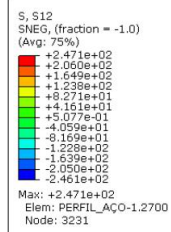
Figura 6.45 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%.

## S12

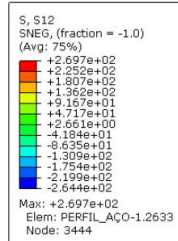
### Prot-Padrão



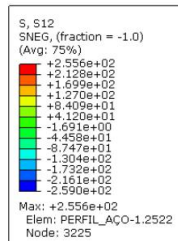
### Prot-Circ2-100%



### Prot-Diam2-100%



### Prot-Hex2-100%



### Prot-Ret2-100%

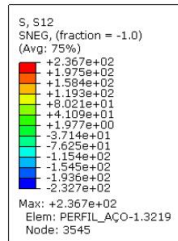


Figura 6.46 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 100%.

#### 6.4.2 Alvéolos com tamanho 75%

Neste subtópico, será analisado o comportamento estrutural das vigas mistas protendidas com alvéolos reduzidos para 75% do tamanho original, mantendo-se constante a altura final da viga. Essa redução busca mitigar os efeitos negativos observados nas vigas com alvéolos de tamanho integral, como grandes deslocamentos, perda de rigidez estrutural e concentrações excessivas de tensões nas bordas e vértices das aberturas.

Espera-se que a diminuição das dimensões dos alvéolos resulte em uma melhor redistribuição das tensões, redução dos deslocamentos máximos e aumento da capacidade de carga, sem comprometer significativamente a eficiência estrutural e o peso total da viga. A análise comparativa abordará os principais parâmetros, como deslocamento máximo e carga máxima suportada (Figura 6.47 e Tabela 6.47) e tensões estruturais (Von Mises, longitudinais e cisalhantes), oferecendo insights para otimizar o desempenho das vigas mistas protendidas com diferentes geometrias de alvéolos.

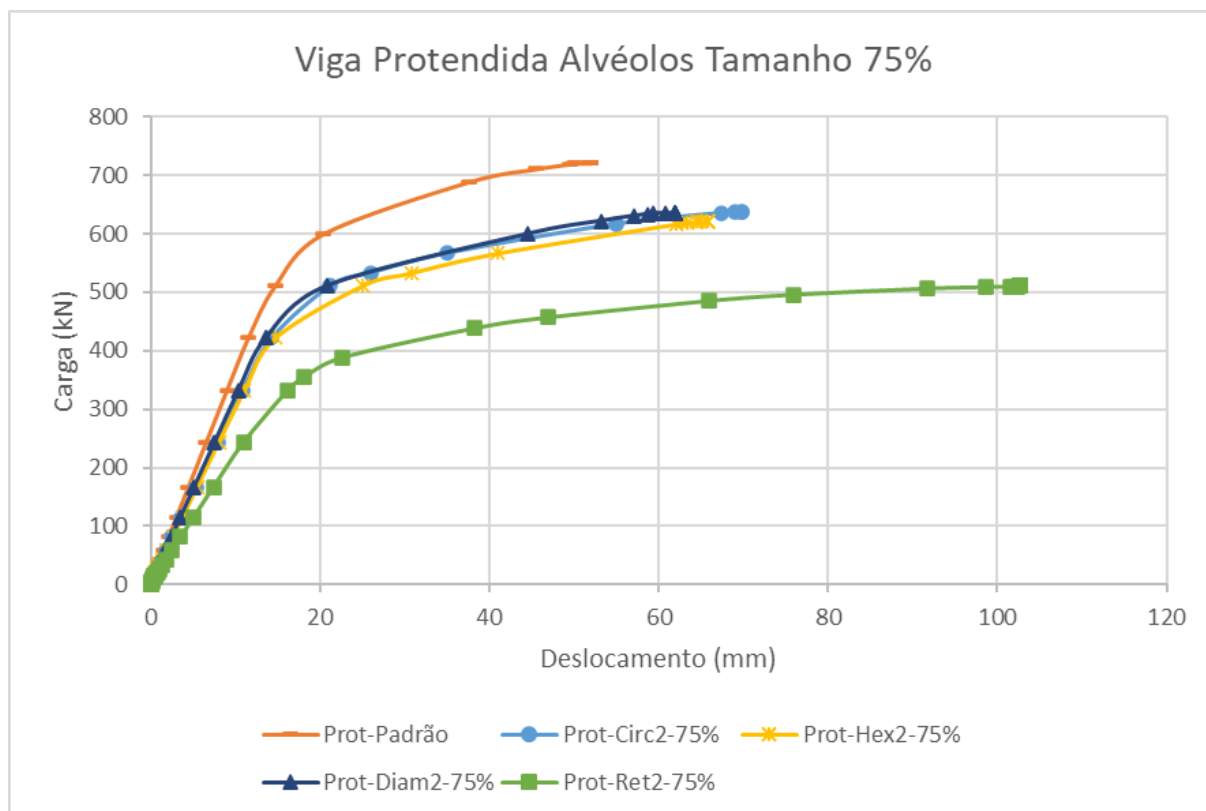


Figura 6.47 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 75%.

Tabela 6.47 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 75%.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%	Peso [kg]	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
31	Prot-Circ2-75%	428,5	+4%	452,7	+1%	233,8	+18%
32	Prot-Hex2-75%	433,1	+5%	464,4	+3%	236,3	+19%
33	Prot-Diam2-75%	442,9	+8%	458,2	+2%	237,5	+20%
34	Prot-Ret2-75%	452,6	+10%	470,4	+5%	244,0	+23%

A análise dos dados da Tabela 6.47 revela o comportamento estrutural das vigas mistas protendidas com alvéolos reduzidos para 75% do tamanho original, comparadas à viga padrão. Essa redução nos alvéolos resultou em alterações significativas nos deslocamentos máximos, capacidade de carga e peso total das vigas, indicando uma melhora geral no desempenho em comparação às vigas com alvéolos de tamanho integral.

Em relação ao deslocamento máximo, todas as vigas apresentaram aumentos moderados, variando entre 4% e 10%. A Prot-Circ2-75% exibiu o menor aumento, com 428,5 mm (+4%), sugerindo que a geometria circular respondeu bem à redução dos alvéolos, proporcionando maior rigidez estrutural. A Prot-Hex2-75% seguiu com um aumento de 5% (433,1 mm), mostrando um desempenho levemente inferior devido às bordas mais pronunciadas dos alvéolos hexagonais. Por outro lado, as vigas Prot-Diam2-75% (442,9 mm, +8%) e Prot-Ret2-75% (452,6 mm, +10%) apresentaram deslocamentos mais elevados, indicando que a geometria com vértices agudos (diamante) e bordas retas (retangular) ainda favorece concentrações de tensões, mesmo com a redução no tamanho dos alvéolos.

Quanto à carga máxima suportada, a redução dos alvéolos resultou em melhorias discretas, com aumentos variando entre 1% e 5%. A Prot-Ret2-75% apresentou a melhor capacidade de carga, com 470,4 kN (+5%), sugerindo que a diminuição das aberturas retangulares reduziu parcialmente as concentrações críticas de tensões e melhorou a distribuição dos esforços. A Prot-Hex2-75% (464,4 kN, +3%) também demonstrou uma resposta positiva, enquanto as vigas Prot-Circ2-75% (452,7 kN, +1%) e Prot-Diam2-75% (458,2 kN, +2%) apresentaram ganhos



mais modestos, sugerindo que a eficiência dessas geometrias depende mais de ajustes específicos na altura e na distribuição dos alvéolos.

Em relação ao peso total das vigas, todas apresentaram um aumento significativo devido à redução das aberturas. A Prot-Circ2-75% teve um aumento de 18% (233,8 kg), enquanto a Prot-Hex2-75% aumentou 19% (236,3 kg). A Prot-Diam2-75% (237,5 kg, +20%) e a Prot-Ret2-75% (244,0 kg, +23%) registraram os maiores aumentos, refletindo a menor remoção de material em comparação com as vigas de tamanho integral. Esse ganho de peso resultou em maior rigidez e melhor comportamento sob carregamento.

Em conclusão, a redução dos alvéolos para 75% do tamanho original trouxe melhorias significativas no comportamento estrutural das vigas protendidas. A Prot-Ret2-75%, apesar de manter as bordas críticas da geometria retangular, apresentou a maior capacidade de carga e compensou parcialmente os deslocamentos excessivos. A Prot-Circ2-75% demonstrou maior controle dos deslocamentos, mantendo uma boa relação entre rigidez e capacidade de carga. Já as vigas Prot-Hex2-75% e Prot-Diam2-75% apresentaram desempenhos intermediários, com ganhos perceptíveis na capacidade de carga, mas com deslocamentos ainda consideráveis. Esses resultados indicam que a redução proporcional das aberturas melhora significativamente o desempenho estrutural, desde que acompanhada de ajustes geométricos adequados e controle do peso final das vigas.

A Tabela 6.48 e as Figura 6.48, 6.49 e 6.50 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

Em relação às tensões Von Mises, todas as vigas com alvéolos apresentaram aumentos significativos em comparação com a viga padrão. A Prot-Hex2-100% registrou o maior aumento (14%), alcançando um valor de 470,1 MPa. Esse comportamento é justificado pelas bordas vivas dos alvéolos hexagonais, que geram concentrações elevadas de tensão. A Prot-Ret2-100%, com um aumento de 13% (463,8 MPa), também apresentou um desempenho crítico, devido às concentrações mais intensas nos vértices das aberturas retangulares. Já as vigas Prot-Circ2-100% (458,5 MPa, +11%) e Prot-Diam2-100% (455,8 MPa, +11%) registraram aumentos menores, com as aberturas circulares e diamantes apresentando uma distribuição um pouco mais uniforme das tensões ao longo das seções alveoladas.

Nas tensões longitudinais (S11), os aumentos foram mais moderados, variando entre 5% e 6%. As vigas Prot-Circ2-100% (474,4 MPa, +6%) e Prot-Ret2-100% (473,7 MPa, +6%) apresentaram os maiores valores, sugerindo que suas geometrias permitiram uma redistribuição mais eficiente das tensões longitudinais ao longo do eixo da viga. Já as vigas Prot-Hex2-100% (471,8 MPa, +5%) e Prot-Diam2-100% (472,7 MPa, +5%) apresentaram aumentos ligeiramente inferiores, mas ainda indicam uma redistribuição estável dos esforços longitudinais.

Nas tensões cisalhantes (S12), as diferenças entre os formatos dos alvéolos são mais evidentes. A Prot-Hex2-100% apresentou o maior aumento, com um acréscimo de 36% (269,7 MPa), refletindo a concentração crítica de tensões nas bordas das aberturas hexagonais. A Prot-Diam2-100% (255,6 MPa, +29%) e a Prot-Circ2-100% (247,1 MPa, +25%) também registraram aumentos expressivos, mas ligeiramente inferiores, graças à geometria mais suave dos alvéolos. Por outro lado, a Prot-Ret2-100% apresentou o menor aumento entre as vigas alveoladas, com 20% (236,7 MPa). Esse comportamento pode ser atribuído ao colapso prematuro da viga, que limita o desenvolvimento de tensões cisalhantes mais elevadas antes da falha estrutural.

Em conclusão, as tensões Von Mises e cisalhantes foram mais sensíveis às variações geométricas dos alvéolos, com valores mais críticos observados nas vigas Prot-Hex2-100% e Prot-Ret2-100%. As tensões longitudinais (S11), por sua vez, permaneceram mais estáveis entre as diferentes configurações, com aumentos moderados em todas as vigas alveoladas. Esses resultados reforçam que a geometria dos alvéolos desempenha um papel fundamental na redistribuição de tensões, sendo necessário um cuidado especial no projeto de vigas com aberturas hexagonais e retangulares para evitar concentrações excessivas que possam comprometer a integridade estrutural.

A análise da Tabela 6.48 revela os efeitos da redução do tamanho dos alvéolos para 75% nas tensões Von Mises, longitudinais (S11) e cisalhantes (S12) em vigas mistas protendidas. A diminuição proporcional das aberturas resultou em uma redistribuição mais equilibrada dos esforços, com aumentos mais controlados das tensões máximas em comparação com as vigas com alvéolos de tamanho integral.

Em relação às tensões Von Mises, houve aumentos variando entre 4% e 10%. A Prot-Circ2-75% apresentou o menor aumento, com 428,5 MPa (+4%), sugerindo que a geometria circular respondeu bem à redução do tamanho das aberturas, diminuindo os pontos críticos de

concentração de tensões. A Prot-Hex2-75%, com 433,1 MPa (+5%), mostrou um desempenho um pouco inferior, evidenciando que suas bordas mais anguladas ainda geram concentrações localizadas de esforços. Por outro lado, a Prot-Diam2-75% (442,9 MPa, +8%) e a Prot-Ret2-75% (452,6 MPa, +10%) registraram os maiores aumentos nas tensões Von Mises, refletindo a natureza mais crítica das bordas e vértices agudos dos alvéolos diamantes e retangulares.

Nas tensões longitudinais (S11), os aumentos foram mais moderados, variando de 1% a 5%. A Prot-Circ2-75% (452,7 MPa, +1%) e a Prot-Diam2-75% (458,2 MPa, +2%) apresentaram os menores acréscimos, sugerindo que suas geometrias permitiram uma redistribuição mais equilibrada das tensões longitudinais. A Prot-Hex2-75% (464,4 MPa, +3%) mostrou um aumento intermediário, enquanto a Prot-Ret2-75% (470,4 MPa, +5%) apresentou o maior valor, evidenciando que os alvéolos retangulares continuam a gerar concentrações mais significativas de tensões longitudinais mesmo após a redução de tamanho.

Quanto às tensões cisalhantes (S12), todas as vigas apresentaram aumentos consideráveis, variando de 18% a 23%. A Prot-Circ2-75% (233,8 MPa, +18%) registrou o menor aumento, mostrando que a geometria circular é menos suscetível às concentrações críticas de cisalhamento. Em seguida, a Prot-Hex2-75% (236,3 MPa, +19%) apresentou um leve aumento, sugerindo uma boa redistribuição dos esforços cisalhantes. A Prot-Diam2-75% (237,5 MPa, +20%) teve um comportamento ligeiramente pior, enquanto a Prot-Ret2-75% (244,0 MPa, +23%) exibiu a maior tensão cisalhante, reforçando que os vértices agudos dos alvéolos retangulares continuam sendo zonas de alta concentração de esforços cisalhantes.

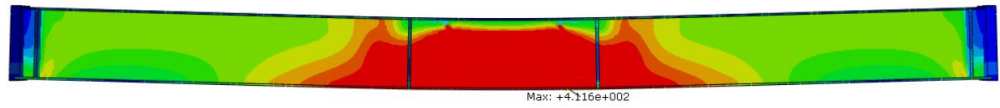
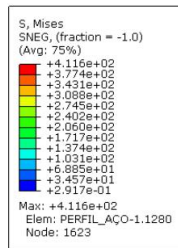
Em conclusão, a redução dos alvéolos para 75% do tamanho original trouxe melhorias evidentes na redistribuição de tensões, com aumentos mais controlados nos valores máximos em comparação com as vigas com aberturas de tamanho integral. A Prot-Circ2-75% mostrou o comportamento mais estável, com aumentos mais modestos nas tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes. A Prot-Hex2-75% apresentou um desempenho intermediário, enquanto a Prot-Diam2-75% mostrou bons resultados nas tensões longitudinais, mas com concentrações mais elevadas em Von Mises e cisalhantes. A Prot-Ret2-75%, por sua vez, apresentou os maiores aumentos em todas as tensões analisadas, indicando que, mesmo com a redução no tamanho das aberturas, a geometria retangular continua sendo a menos eficiente em termos de redistribuição de esforços.

Tabela 6.48 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%.

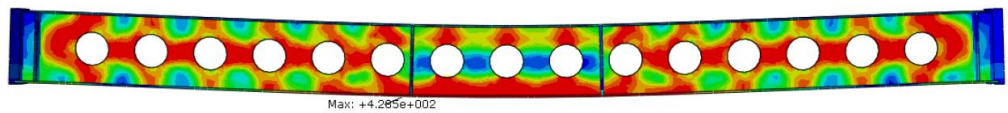
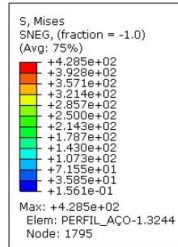
	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
31	Prot-Circ2-75%	428,5	+4%	452,7	+1%	233,8	+18%
32	Prot-Hex2-75%	433,1	+5%	464,4	+3%	236,3	+19%
33	Prot-Diam2-75%	442,9	+8%	458,2	+2%	237,5	+20%
34	Prot-Ret2-75%	452,6	+10%	470,4	+5%	244,0	+23%

## Mises

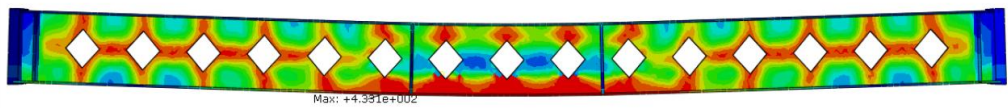
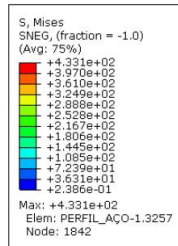
### Prot-Padrão



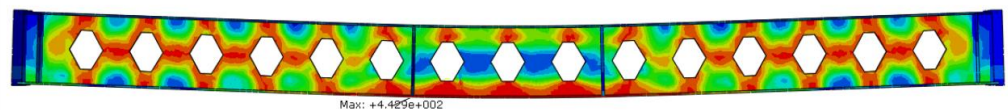
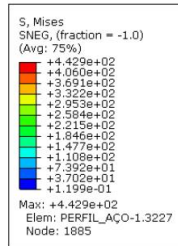
### Prot-Circ2-75%



### Prot-Diam2-75%



### Prot-Hex2-75%



### Prot-Ret2-75%

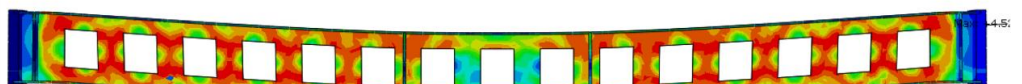
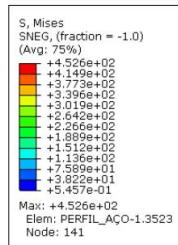


Figura 6.48 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%.

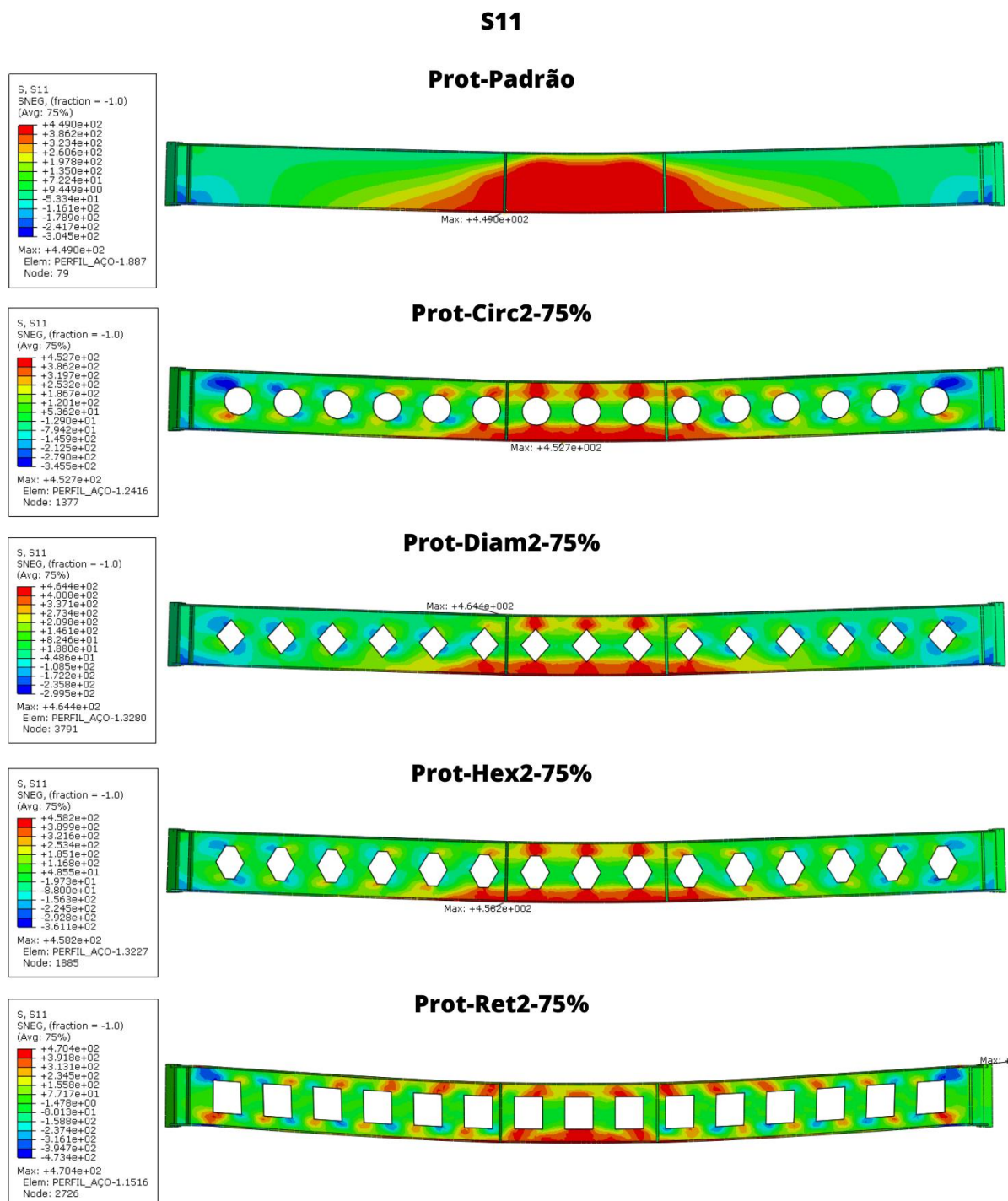


Figura 6.49 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%.

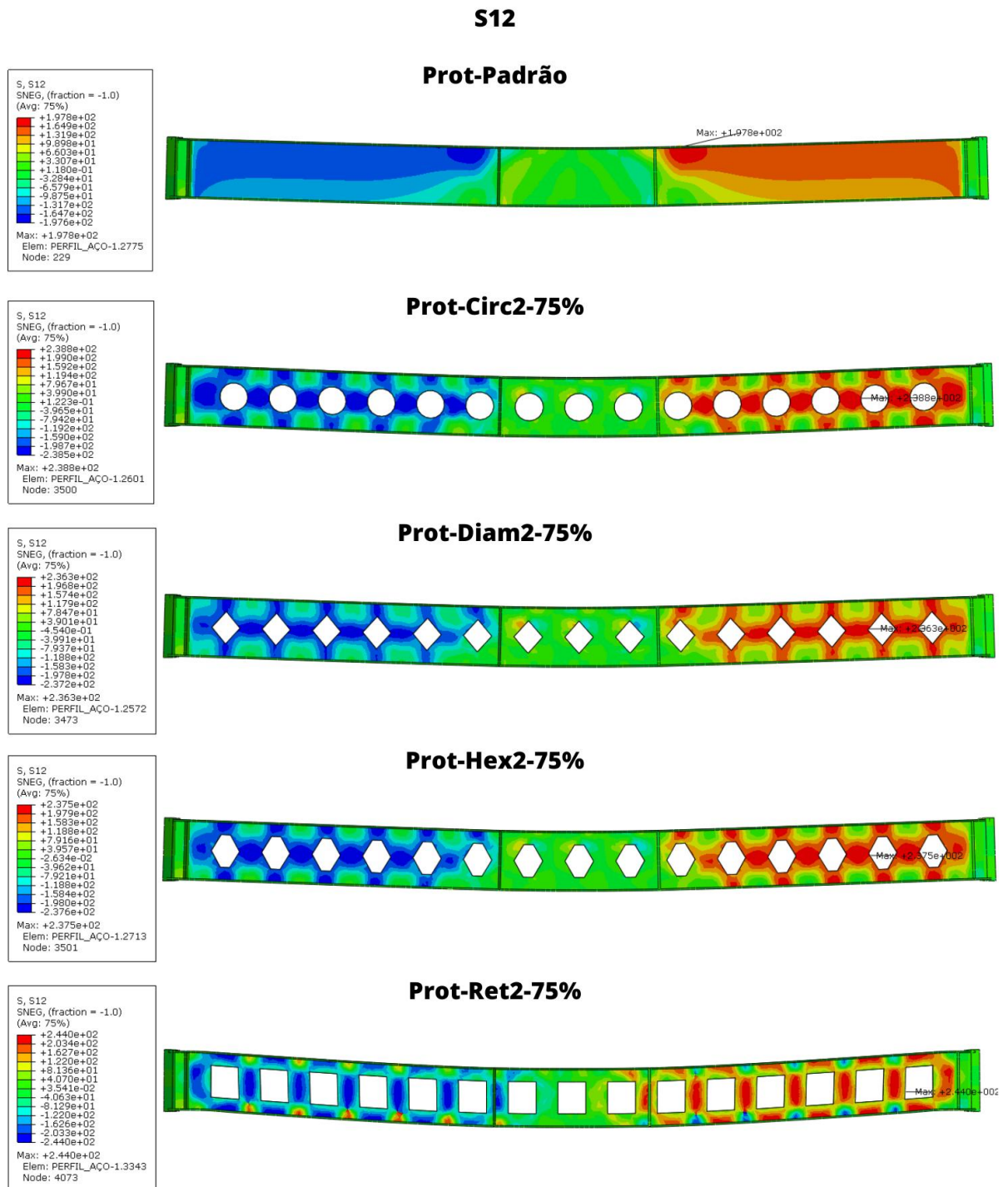


Figura 6.50 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 75%.

### 6.4.3 Alvéolos com tamanho 50%

Neste subtópico, será analisado o comportamento estrutural das vigas mistas protendidas com alvéolos reduzidos para 50% do tamanho original, mantendo-se constante a altura final das vigas. Essa configuração representa uma redução significativa das aberturas, buscando minimizar os efeitos negativos observados nas configurações anteriores, como grandes deslocamentos, elevadas concentrações de tensões e perda de capacidade de carga.

A análise comparativa será conduzida com base nos principais parâmetros estruturais, incluindo deslocamento máximo e carga máxima suportada (Figura 6.51 e Tabela 6.49), e tensões (Von Mises, longitudinais e cisalhantes), além do impacto no peso final das vigas. O objetivo é avaliar como a redução para 50% no tamanho dos alvéolos influencia o comportamento global das vigas, permitindo identificar vantagens e limitações dessa abordagem no projeto de vigas mistas protendidas com diferentes geometrias de alvéolos.

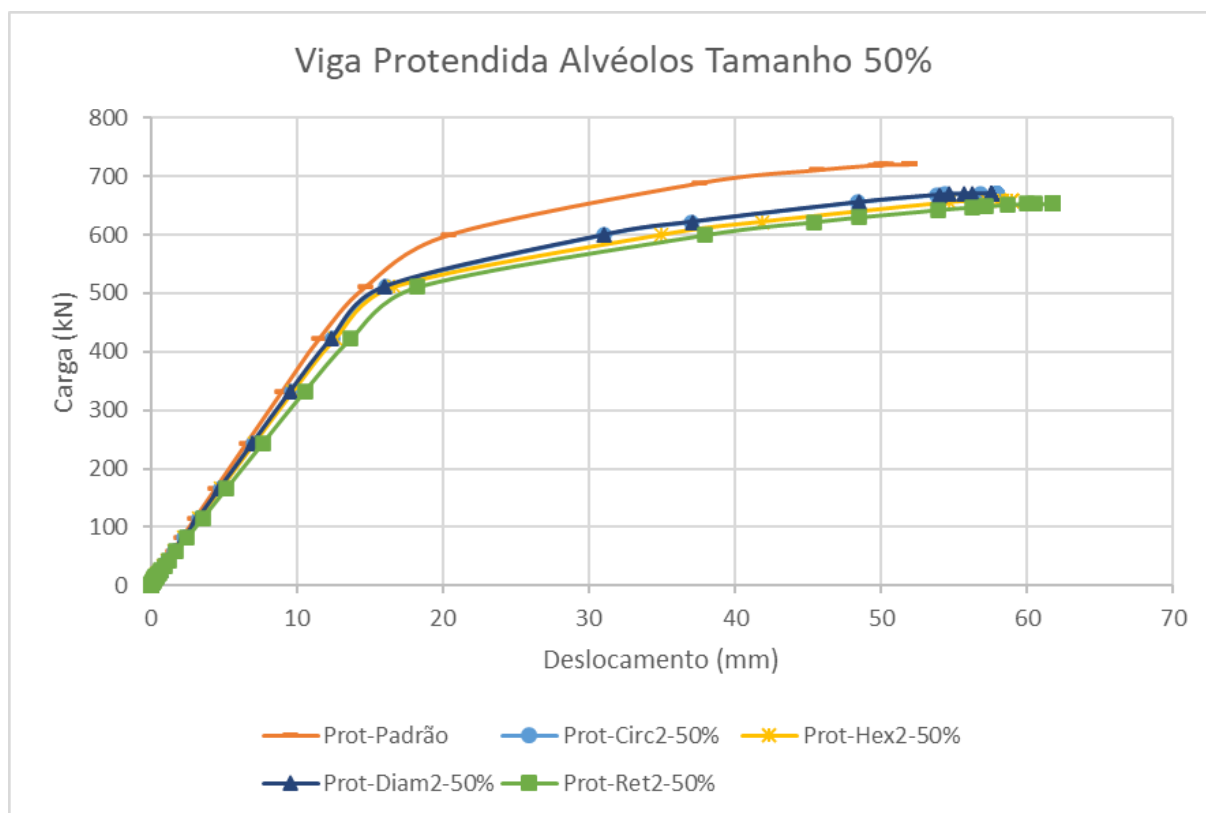


Figura 6.51 - Curva carga x deslocamento das vigas protendidas com alvéolos tamanho 50%.



Tabela 6.49 - Comparação do deslocamento máximo [mm], carga máxima [kN] e peso [kg] do perfil de aço com alvéolos tamanho 50%.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%	Peso [kg]	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-	221,75	-
35	Prot-Circ2-50%	57,88	+11,5%	671,24	-6,9%	206,33	-7,0%
36	Prot-Hex2-50%	58,92	+13,5%	659,07	-8,6%	206,36	-7%
37	Prot-Diam2-50%	57,57	+10,9%	670,18	-7,1%	210,15	-5%
38	Prot-Ret2-50%	61,76	+18,9%	653,39	-9,4%	198,76	-10%

Em relação ao deslocamento máximo, todas as vigas apresentaram valores significativamente menores em comparação com os alvéolos de tamanhos integrais e de 75%. A Prot-Circ2-50% registrou um deslocamento de 57,88 mm (+11,5%), indicando um bom controle das deformações, com uma resposta estrutural mais estável devido à suavidade da geometria circular. A Prot-Hex2-50%, com 58,92 mm (+13,5%), apresentou um leve aumento adicional, possivelmente relacionado às bordas mais pronunciadas dos alvéolos hexagonais, que ainda favorecem a formação de zonas de concentração de tensões. A Prot-Diam2-50% teve o menor deslocamento entre as três primeiras vigas, com 57,57 mm (+10,9%), sugerindo que, mesmo com vértices mais agudos, a redução das aberturas proporcionou maior rigidez global. Já a Prot-Ret2-50%, com 61,76 mm (+18,9%), apresentou o maior deslocamento, mostrando que, mesmo com a redução das aberturas, a geometria retangular continua mais suscetível a deformações excessivas.

Quanto à carga máxima suportada, os resultados mostram uma tendência de recuperação da capacidade estrutural das vigas. A Prot-Circ2-50% suportou 671,24 kN (-6,9%), enquanto a Prot-Diam2-50% apresentou um valor muito próximo, de 670,18 kN (-7,1%), indicando que ambas as geometrias responderam bem à redução dos alvéolos. A Prot-Hex2-50%, com 659,07 kN (-8,6%), apresentou um desempenho levemente inferior, refletindo que suas bordas mais anguladas ainda influenciam a distribuição das tensões. A Prot-Ret2-50%, por outro lado, registrou a menor carga máxima, com 653,39 kN (-9,4%), confirmando que a geometria retangular continua sendo menos eficiente para resistir aos esforços máximos, mesmo após a redução dos alvéolos.

Em relação ao peso total das vigas, todas apresentaram valores mais próximos ao da viga padrão devido à diminuição na quantidade de material removido pelas aberturas. A Prot-Circ2-50% e a Prot-Hex2-50% apresentaram pesos muito semelhantes, de 206,33 kg (-7%) e 206,36 kg (-7%), respectivamente, indicando que suas configurações tiveram impacto similar no uso de material.

Em conclusão, a redução dos alvéolos para 50% do tamanho original resultou em melhorias significativas no comportamento estrutural das vigas mistas protendidas. As vigas Prot-Circ2-50% e Prot-Ret2-50%, apesar da redução dos alvéolos, continuou apresentando maiores deslocamentos e menor capacidade de carga, evidenciando que a geometria retangular permanece menos eficiente para resistir aos esforços aplicados.

Os resultados indicam que, a partir de um determinado tamanho de alvéolo, as diferenças de eficiência estrutural entre os formatos tendem a se tornar menos expressivas.

A Tabela 6.50 e as Figura 6.52, 6.53 e 6.54 fornecem informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

Para as tensões Von Mises, todas as vigas com alvéolos apresentaram aumentos moderados, variando entre 3% e 5% em comparação com a viga padrão. A Prot-Circ2-50%, com 432,6 MPa (+5%), e a Prot-Hex2-50%, com 431,4 MPa (+5%), demonstraram resultados muito próximos, sugerindo que tanto a geometria circular quanto a hexagonal responderam bem à redução dos alvéolos. A Prot-Diam2-50%, com 432,0 MPa (+5%), apresentou um comportamento semelhante, evidenciando que a geometria diamante também se beneficiou dessa redução. Já a Prot-Ret2-50%, com 424,5 MPa (+3%), registrou o menor aumento nas tensões Von Mises, mas esse valor pode estar associado à limitação na capacidade de redistribuição de esforços devido à geometria menos eficiente dos alvéolos retangulares.

Nas tensões longitudinais (S11), os valores foram mais estáveis, com aumentos variando entre 0% e 6%. As vigas Prot-Circ2-50% (471,2 MPa, +5%), Prot-Hex2-50% (473,5 MPa, +5%) e Prot-Diam2-50% (475,0 MPa, +6%) apresentaram aumentos muito próximos, indicando que a redução no tamanho dos alvéolos proporcionou uma distribuição mais uniforme das tensões longitudinais ao longo da viga. Em contraste, a Prot-Ret2-50% (447,7 MPa, 0%) não apresentou

aumento significativo, o que pode ser explicado por um colapso prematuro ou uma distribuição ineficiente dos esforços ao longo da geometria retangular.

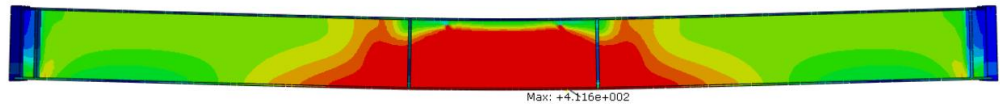
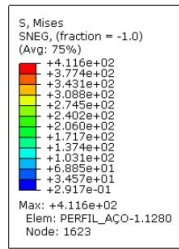
As tensões cisalhantes (S12), por outro lado, apresentaram os maiores aumentos percentuais, variando entre 14% e 20%. A Prot-Circ2-50% (226,1 MPa, +14%) e a Prot-Hex2-50% (228,6 MPa, +16%) demonstraram aumentos mais moderados, indicando que suas geometrias suavizaram parcialmente as concentrações críticas de esforços cisalhantes. A Prot-Diam2-50% (233,3 MPa, +18%) apresentou um valor um pouco mais elevado, sugerindo que os vértices mais agudos dos alvéolos ainda geraram zonas de concentração de esforços. A Prot-Ret2-50% (237,6 MPa, +20%) registrou o maior aumento, confirmando que a geometria retangular permanece a mais desfavorável para a redistribuição das tensões cisalhantes, mesmo com a redução no tamanho das aberturas.

Tabela 6.50 - Comparação das tensões em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%.

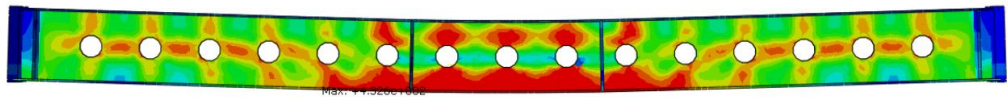
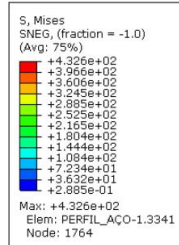
	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
35	Prot-Circ2-50%	432,6	+5%	471,2	+5%	226,1	+14%
36	Prot-Hex2-50%	431,4	+5%	473,5	+5%	228,6	+16%
37	Prot-Diam2-50%	432,0	+5%	475,0	+6%	233,3	+18%
38	Prot-Ret2-50%	424,5	+3%	447,7	+0%	237,6	+20%

## Mises

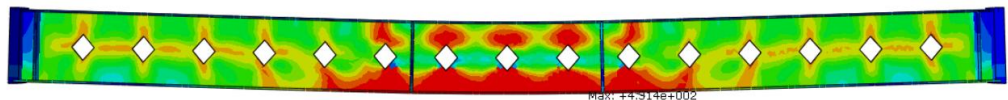
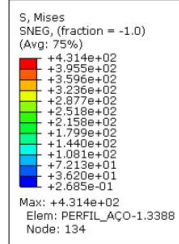
### Prot-Padrão



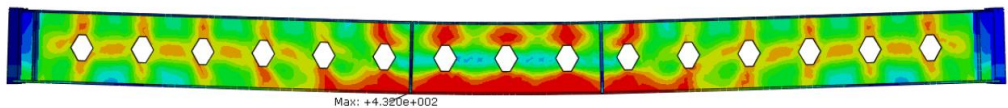
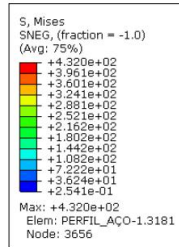
### Prot-Circ2-50%



### Prot-Diam2-50%



### Prot-Hex2-50%



### Prot-Ret2-50%

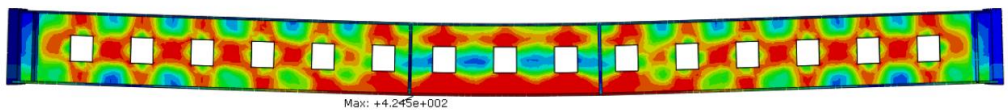
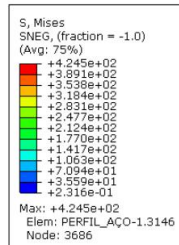
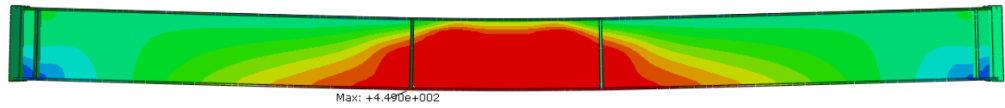
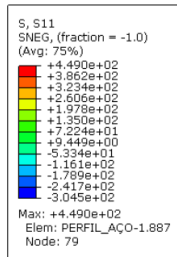


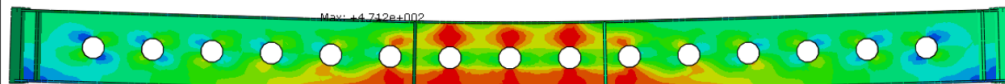
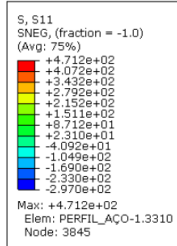
Figura 6.52 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%.

## S11

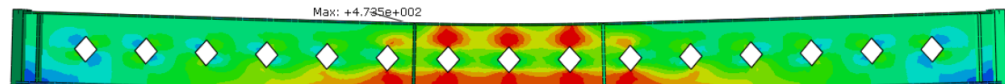
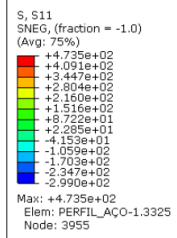
### Prot-Padrão



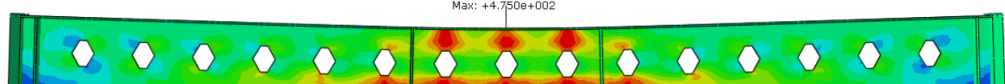
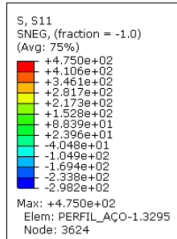
### Prot-Circ2-50%



### Prot-Diam2-50%



### Prot-Hex2-50%



### Prot-Ret2-50%

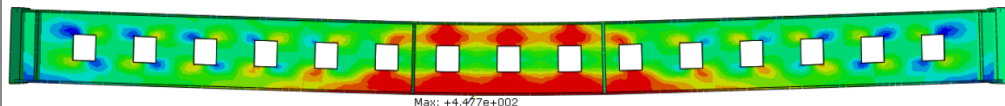
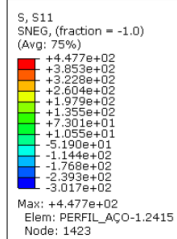
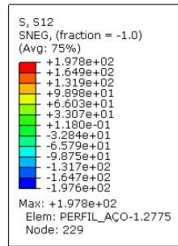


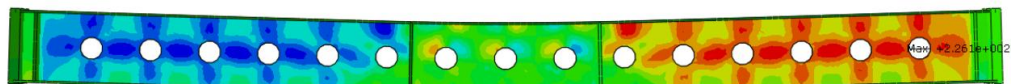
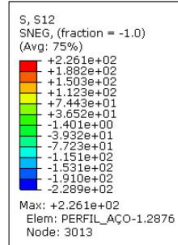
Figura 6.53 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%.

## S12

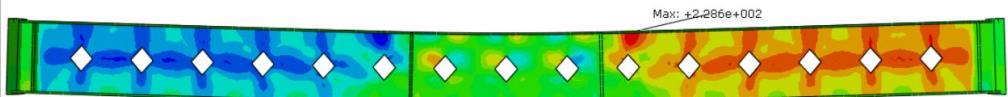
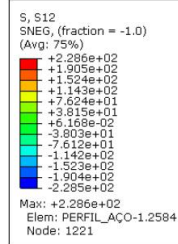
### Prot-Padrão



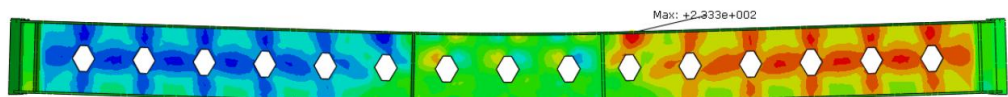
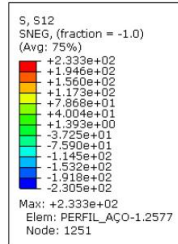
### Prot-Circ2-50%



### Prot-Diam2-50%



### Prot-Hex2-50%



### Prot-Ret2-50%

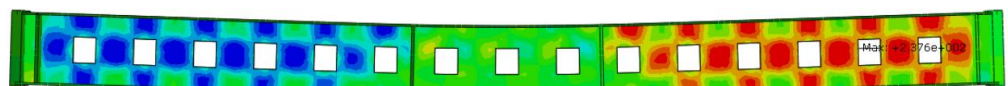
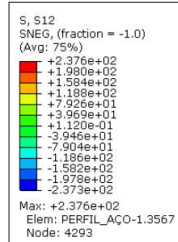


Figura 6.54 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em vigas mistas protendidas com alvéolos tamanho 50%.

## 6.5 ALTERAÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS NA ViMAP

Neste tópico, será analisado o comportamento estrutural das vigas mistas protendidas (ViMAPs) com alvéolos circulares (Prot-Circ1) e hexagonais (Prot-Hex1), variando apenas o espaçamento entre os alvéolos ao longo do comprimento das vigas. Ao contrário das análises anteriores, nesta abordagem, não será considerado o acastelamento, mas apenas a presença isolada das aberturas nos perfis das vigas, com variações no intervalo entre elas, já que o processo de acastelamento precisa de proporções específicas entre tamanho de alvéolo e espaçamento entre os mesmos para que o encaixe funcione de maneira adequada.

A alteração do espaçamento tem impacto direto no comportamento estrutural global da viga, influenciando parâmetros importantes como distribuição das tensões, deslocamento máximo, capacidade de carga e rigidez global. Espaçamentos menores tendem a gerar uma maior concentração de esforços e deslocamentos, enquanto espaçamentos maiores podem proporcionar uma melhor redistribuição das cargas e das tensões ao longo do perfil da viga.

O objetivo desta análise é identificar a influência do espaçamento entre os alvéolos no desempenho estrutural das ViMAPs, comparando como os formatos circulares e hexagonais respondem às variações nos intervalos das aberturas, a indicação das vigas modeladas está na Tabela 6.51, onde os espaçamentos são 120 mm, 150 mm e 200 mm. Na Figura 6.55 tem as especificações das dimensões das vigas modeladas.

Tabela 6.51 -Indicação das vigas modeladas alterando espaçamento.

Formato	Espaçamento			
	Tradicional	120 mm	150 mm	200 mm
Padrão	Prot-Padrão			
Círculo 1	Prot-Circ1	Prot-Circ1-e120	Prot-Circ1-e150	Prot-Circ1-e200
Hexágono 1	Prot-Hex1	Prot-Hex1-e120	Prot-Hex1-e150	Prot-Hex1-e200

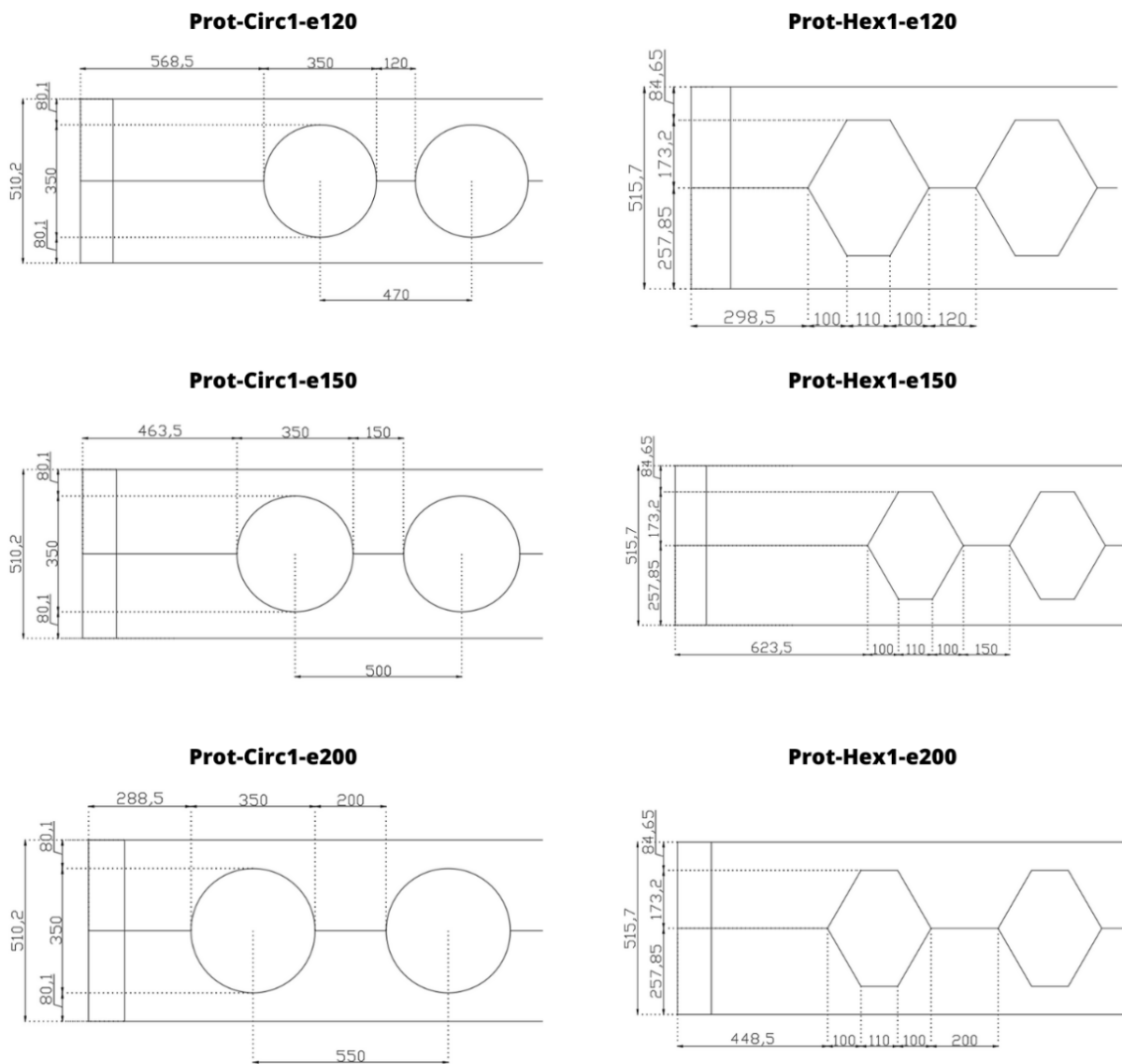


Figura 6.55 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e hexagonais com espaçamentos alterados.

### 6.5.1 Alvéolos Circulares

Analisando a influência do espaçamento entre os alvéolos circulares no comportamento estrutural das vigas mistas protendidas (ViMAPs). A geometria circular, devido à sua suavidade e ausência de vértices agudos, geralmente apresenta boa distribuição das tensões ao redor das aberturas. No entanto, a variação no espaçamento entre os alvéolos pode alterar significativamente o desempenho da viga, afetando parâmetros como rigidez, deslocamento máximo e capacidade de carga, indicados na Figura 6.56 e na Tabela 6.52, e a distribuição das



tensões Von Mises, longitudinais (S11) e cisalhantes (S12), indicados na Tabela 6.53 e nas Figura 6.57, 6.67 e 6.68, respectivamente.

Espaçamentos menores entre os alvéolos tendem a reduzir a área de seção resistente da viga, aumentando a probabilidade de concentrações de tensões e deslocamentos excessivos. Por outro lado, espaçamentos maiores podem proporcionar uma melhor redistribuição dos esforços, reduzindo as zonas críticas de concentração de tensões e melhorando a capacidade de carga da viga.

A análise comparativa focará nos efeitos das variações de espaçamento sobre esses parâmetros estruturais, avaliando como a geometria circular interage com diferentes distribuições longitudinais de aberturas.

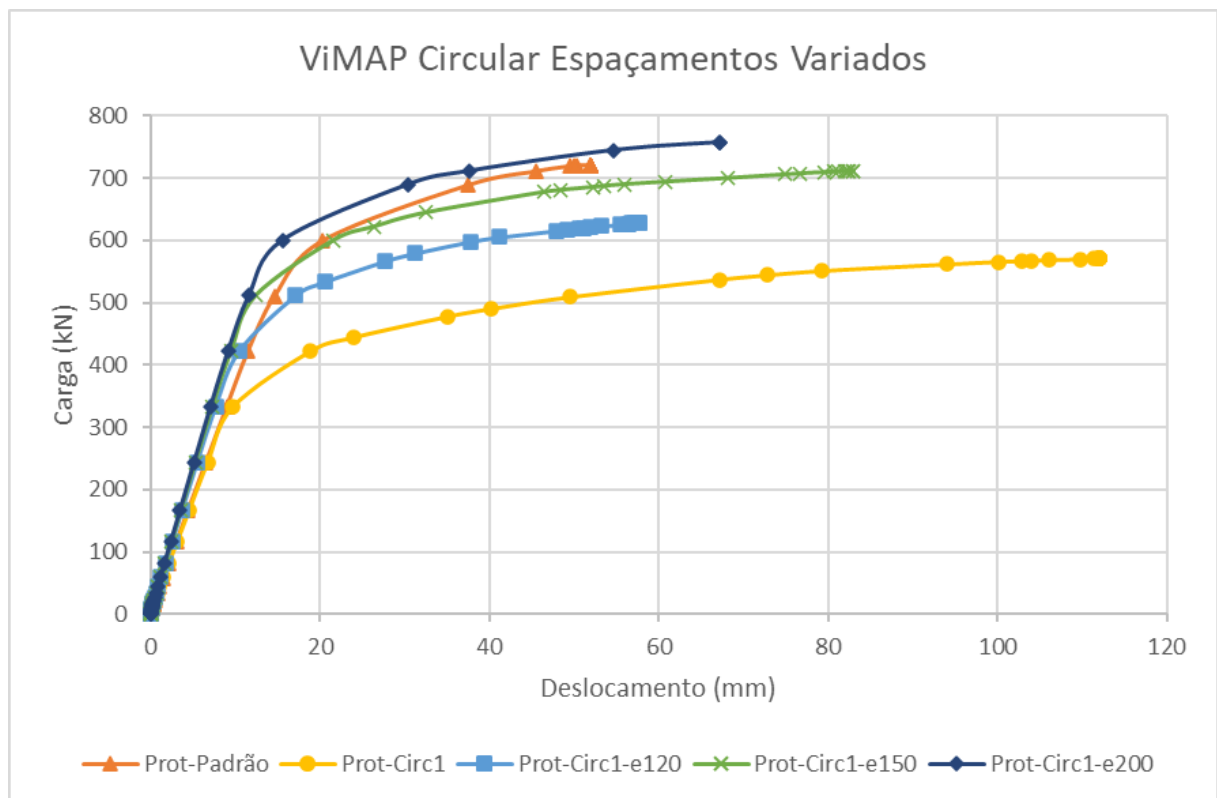


Figura 6.56 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

Tabela 6.52 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
15	Prot-Circ1	112,04	+115,7%	570,77	-20,9%
39	Prot-Circ1-e120	57,69	+11,1%	628,09	-12,9%
40	Prot-Circ1-e150	82,99	+59,8%	712,18	-1,2%
41	Prot-Circ1-e200	67,18	+29,4%	757,62	5,1%

A Tabela 6.54 apresenta os resultados das vigas mistas protendidas com alvéolos circulares, analisando como diferentes espaçamentos entre as aberturas afetam o desempenho estrutural em termos de deslocamento máximo (U2) e capacidade de carga (kN). A comparação entre os espaçamentos de 120 mm, 150 mm e 200 mm evidencia uma clara relação entre o intervalo das aberturas e a eficiência estrutural das vigas.

Inicialmente, a Prot-Circ1, com espaçamento regular entre os alvéolos, apresentou um deslocamento significativo de 112,04 mm (+115,7%) e uma redução na capacidade de carga para 570,77 kN (-20,9%), indicando perda considerável de rigidez e resistência devido à redução da seção resistente eficaz. Com o aumento do espaçamento para 120 mm (Prot-Circ1-e120), o deslocamento reduziu para 57,69 mm (+11,1%) e a capacidade de carga aumentou para 628,09 kN (-12,9%). Esse resultado demonstra que o aumento no espaçamento melhorou a distribuição dos esforços e reduziu os efeitos das concentrações críticas de tensão.

Quando o espaçamento foi ajustado para 150 mm (Prot-Circ1-e150), os resultados apresentaram melhorias ainda mais significativas. O deslocamento foi moderado para 82,99 mm (+59,8%), enquanto a capacidade de carga subiu para 712,18 kN (-1,2%), aproximando-se dos valores da viga padrão. Esse intervalo representa um equilíbrio ideal entre rigidez e resistência, permitindo uma redistribuição eficiente das tensões sem perda excessiva de material resistente. Já com o espaçamento de 200 mm (Prot-Circ1-e200), o deslocamento reduziu para 67,18 mm (+29,4%) e a capacidade de carga atingiu 757,62 kN (+5,1%), superando até mesmo a viga padrão. Esse espaçamento mostrou ser extremamente eficaz na otimização do desempenho estrutural global.

A Tabela 6.53 apresenta os resultados das tensões máximas (Von Mises, longitudinais e cisalhantes) em vigas mistas protendidas (ViMAPs) com alvéolos circulares, comparando os efeitos da variação no espaçamento entre as aberturas (120 mm, 150 mm e 200 mm).

Nas tensões Von Mises, a Prot-Circ1, com espaçamento regular, apresentou um aumento significativo de 16% (478,6 MPa) em relação à viga padrão. Isso indica alta concentração de tensões ao redor das aberturas, comprometendo o desempenho estrutural. Ao aumentar o espaçamento para 120 mm (Prot-Circ1-e120), houve uma redução para 460,0 MPa (+12%), sugerindo uma melhora significativa na redistribuição das tensões e uma diminuição das zonas críticas. No espaçamento de 150 mm (Prot-Circ1-e150), as tensões Von Mises aumentaram novamente para 467,3 MPa (+14%), sugerindo que, embora tenha havido melhora em relação à configuração inicial, a concentração de esforços ainda persiste. No espaçamento de 200 mm (Prot-Circ1-e200), observou-se a melhor redução, com um valor de 440,0 MPa (+7%), aproximando-se dos valores observados na viga padrão. Isso indica que maiores espaçamentos permitem uma melhor redistribuição dos esforços ao longo da viga.

Em relação às tensões longitudinais (S11), os valores apresentaram variações menos expressivas. A Prot-Circ1 registrou um aumento de 5% (472,1 MPa) em comparação com a viga padrão, refletindo uma leve concentração de esforços longitudinais. Com o espaçamento ajustado para 120 mm (Prot-Circ1-e120), houve uma redução para 464,9 MPa (+4%), demonstrando uma leve redistribuição das tensões longitudinais. O espaçamento de 150 mm (Prot-Circ1-e150) manteve o valor praticamente inalterado em 465,4 MPa (+4%), sugerindo que esse parâmetro tem baixa sensibilidade ao espaçamento entre os alvéolos. No espaçamento de 200 mm (Prot-Circ1-e200), as tensões longitudinais voltaram ao patamar inicial, com 473,2 MPa (+5%), sugerindo que os espaçamentos maiores têm impacto mínimo nessa componente específica das tensões.

As tensões cisalhantes (S12), por outro lado, apresentaram variações mais acentuadas em resposta à modificação no espaçamento dos alvéolos. A Prot-Circ1 exibiu um aumento significativo de 33% (263,2 MPa), indicando que as bordas das aberturas circulares criaram zonas críticas de cisalhamento. Com espaçamento ajustado para 120 mm (Prot-Circ1-e120), as tensões cisalhantes reduziram para 252,7 MPa (+28%), sugerindo uma melhora relevante na redistribuição das tensões. No espaçamento de 150 mm (Prot-Circ1-e150), as tensões

cisalhantes aumentaram novamente para 268,2 MPa (+36%), refletindo que o intervalo adotado não foi suficiente para eliminar as zonas críticas nas bordas dos alvéolos. Finalmente, no espaçamento de 200 mm (Prot-Circ1-e200), as tensões cisalhantes reduziram para 253,5 MPa (+28%), próximo aos valores observados na configuração com espaçamento de 120 mm, indicando uma boa eficiência na redistribuição dos esforços cisalhantes com maiores espaçamentos.

Os resultados mostram que a variação no espaçamento dos alvéolos circulares impacta principalmente as tensões Von Mises e cisalhantes, enquanto as tensões longitudinais permanecem relativamente estáveis independentemente do espaçamento adotado.

O espaçamento de 120 mm (Prot-Circ1-e120) proporcionou melhorias notáveis, com redução nas tensões Von Mises e cisalhantes. Já o espaçamento de 150 mm (Prot-Circ1-e150) apresentou um aumento inesperado nas tensões Von Mises e cisalhantes, sugerindo que esse intervalo não foi suficiente para mitigar os efeitos das aberturas. Por outro lado, o espaçamento de 200 mm (Prot-Circ1-e200) apresentou os melhores resultados, com redução significativa nas tensões Von Mises e cisalhantes, aproximando-se do desempenho observado na viga padrão.

Tabela 6.53 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
15	Prot-Circ1	478,6	+16%	472,1	+5%	263,2	+33%
39	Prot-Circ1-e120	460,0	+12%	464,9	+4%	252,7	+28%
40	Prot-Circ1-e150	467,3	+14%	465,4	+4%	268,2	+36%
41	Prot-Circ1-e200	440,0	+7%	473,2	+5%	253,5	+28%

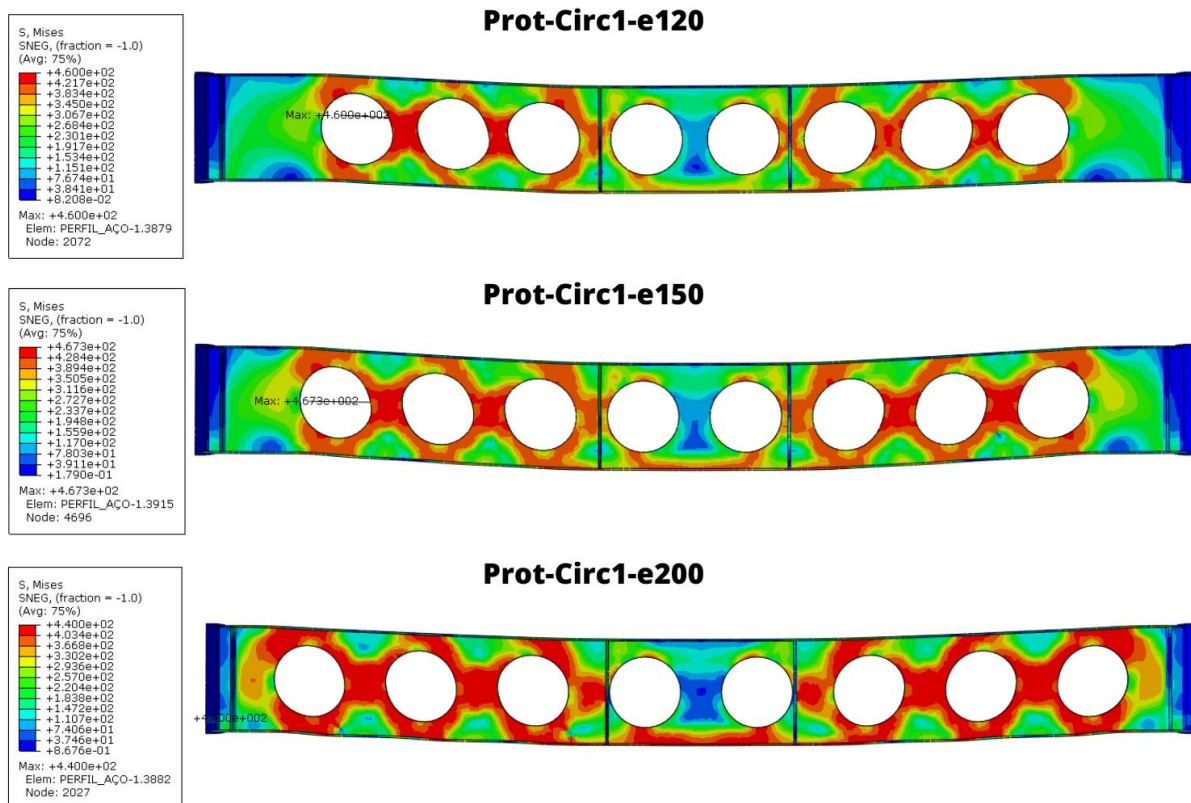


Figura 6.57 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

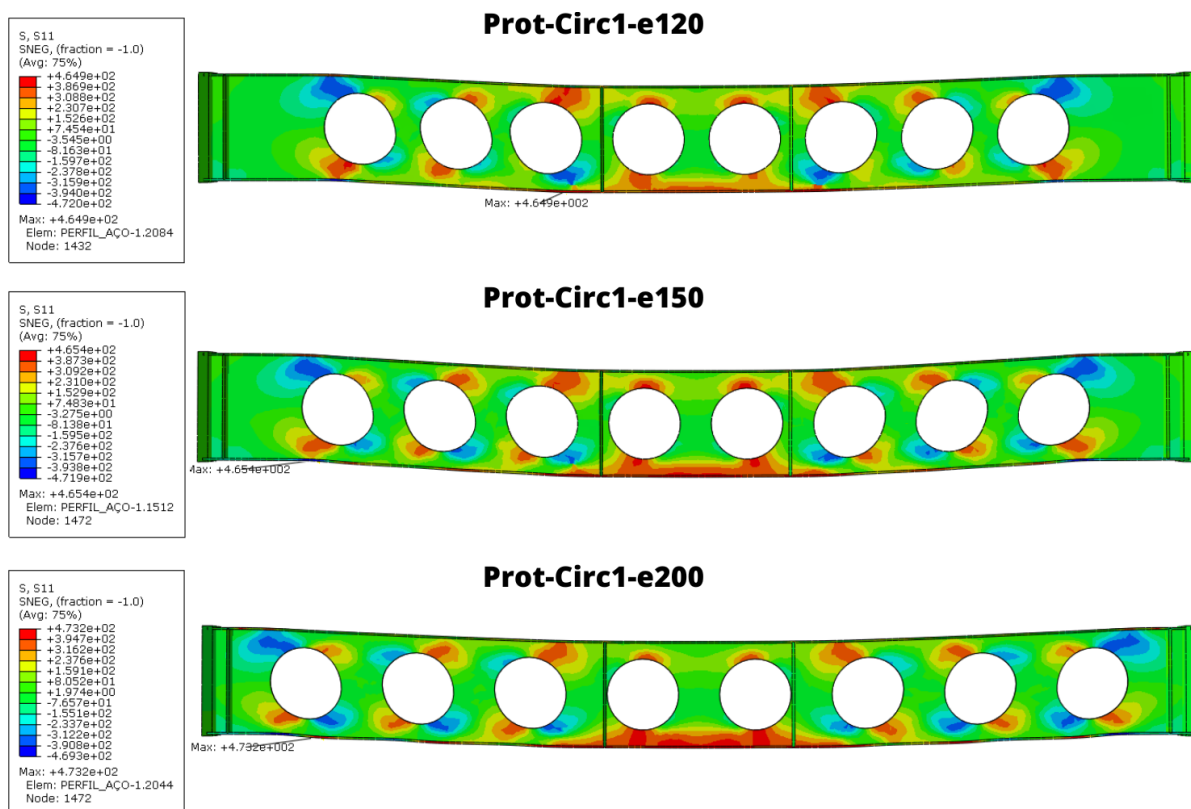


Figura 6.58 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

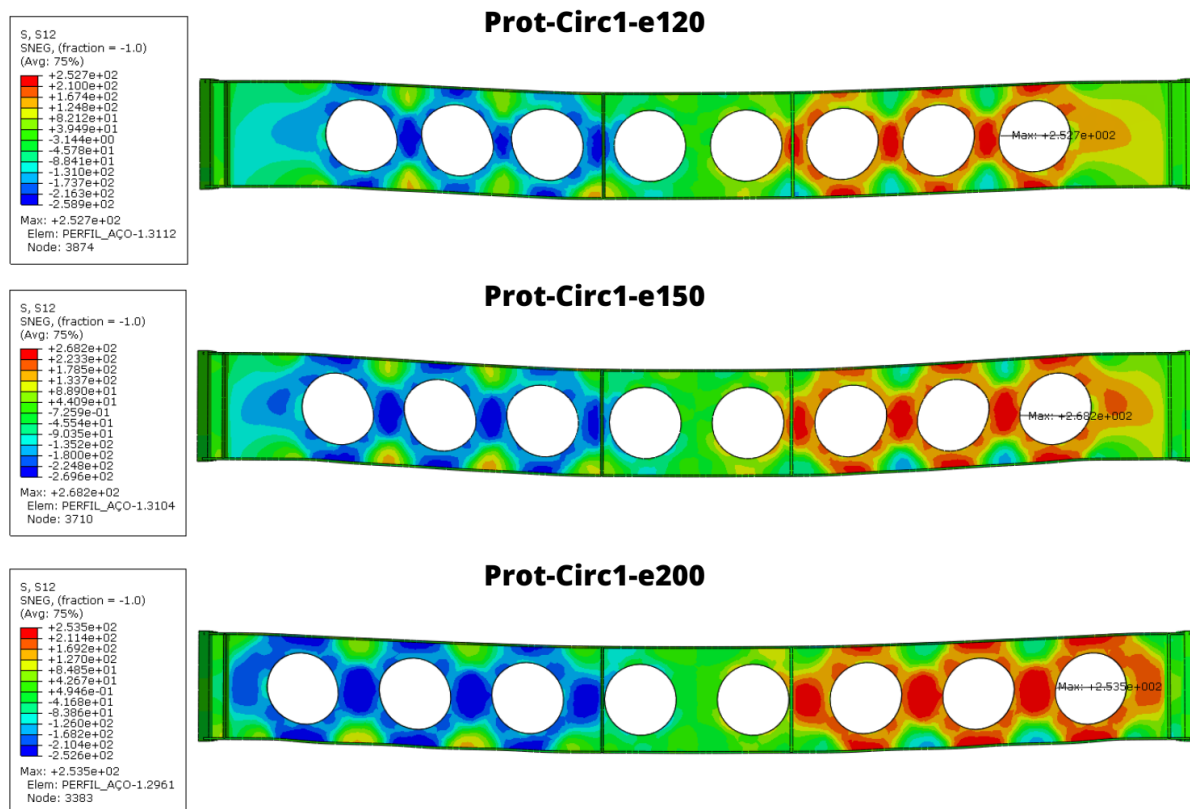


Figura 6.59 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares espaçados.

## 6.5.2 Alvéolos Hexagonais

Neste subtópico, será analisada a influência do espaçamento entre os alvéolos hexagonais no comportamento estrutural das vigas mistas protendidas (ViMAPs). A geometria hexagonal, por suas arestas bem definidas e vértices angulados, tende a gerar zonas críticas de concentração de tensões, principalmente ao redor das bordas e nos vértices das aberturas.

A alteração do espaçamento entre os alvéolos tem um impacto direto na distribuição dessas tensões e, conseqüentemente, no desempenho global da estrutura, afetando parâmetros como rigidez, deslocamento máximo e capacidade de carga, indicados na Figura 6.60 e na Tabela 6.54, e distribuição das tensões Von Mises, longitudinais (S11) e cisalhantes (S12). Espaçamentos menores tendem a reduzir a área resistente efetiva da viga, aumentando a suscetibilidade a deslocamentos excessivos e elevadas concentrações de esforços. Por outro lado, espaçamentos maiores permitem uma redistribuição mais eficiente das tensões, melhorando tanto a capacidade de carga quanto a rigidez da estrutura.

Neste estudo, serão comparadas configurações com diferentes espaçamentos (120 mm, 150 mm e 200 mm) e seus efeitos no desempenho das vigas protendidas com alvéolos hexagonais. A análise busca identificar um espaçamento ideal, que proporcione o equilíbrio entre eficiência estrutural, segurança e aproveitamento otimizado do material, servindo como referência para futuros projetos de ViMAPs com alvéolos hexagonais.

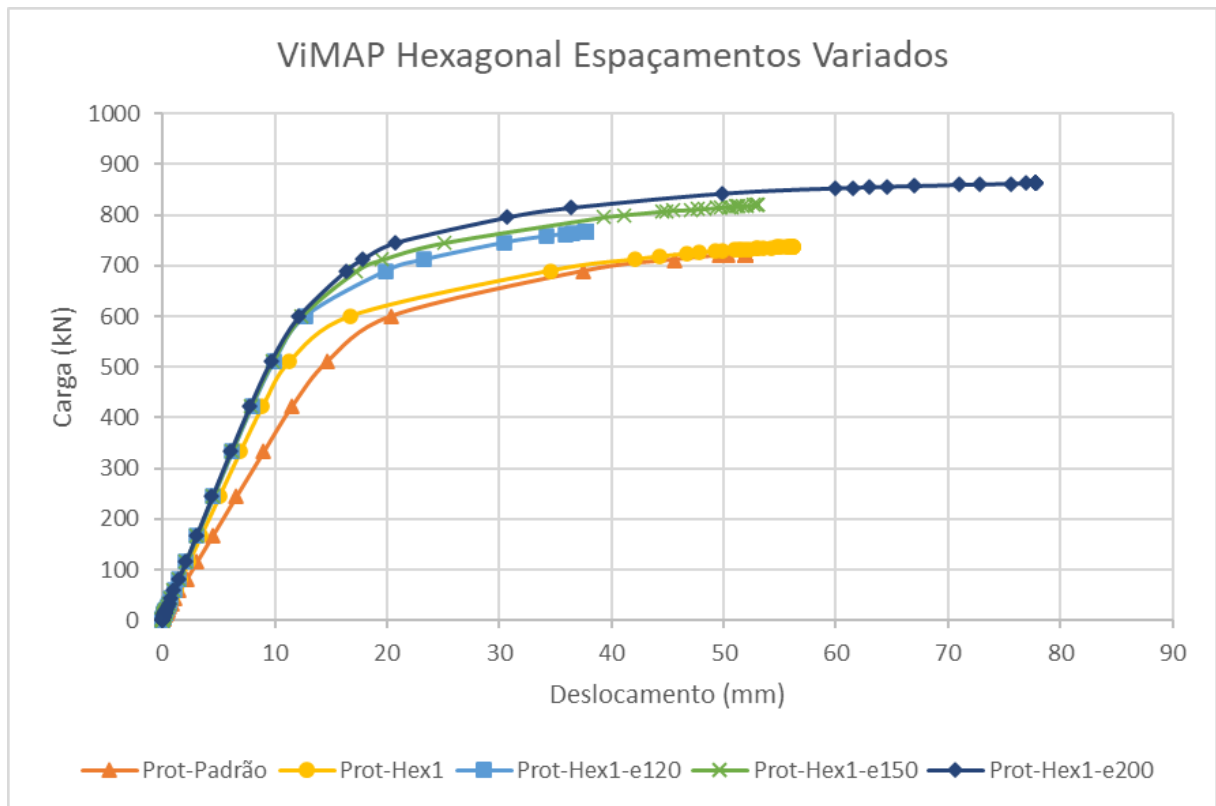


Figura 6.60 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

Tabela 6.54 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
18	Prot-Hex1	56,23	+8,3%	737,09	+2,2%
42	Prot-Hex1-e120	37,78	-27,2%	767,04	+6,4%
43	Prot-Hex1-e150	53,07	+2,2%	819,56	+13,6%
44	Prot-Hex1-e200	77,72	+49,7%	862,15	+19,5%

Inicialmente, a Prot-Hex1, com espaçamento regular entre os alvéolos, apresentou um deslocamento de 56,23 mm (+8,3%) e uma capacidade de carga de 737,09 kN (+2,2%) em comparação com a viga padrão. Esses valores sugerem que, embora tenha ocorrido um leve aumento na capacidade de carga, o deslocamento mais elevado evidencia zonas críticas de concentração de tensões, especialmente nas regiões próximas aos vértices dos alvéolos.

Com o espaçamento ajustado para 120 mm (Prot-Hex1-e120), houve uma redução expressiva no deslocamento máximo para 37,78 mm (-27,2%), indicando uma recuperação notável na rigidez estrutural. A capacidade de carga também aumentou para 767,04 kN (+6,4%), refletindo uma redistribuição mais eficiente das tensões ao longo da viga. Esse espaçamento permitiu minimizar os efeitos adversos das bordas angulares dos alvéolos hexagonais, resultando em uma estrutura mais estável.

Ao aumentar o espaçamento para 150 mm (Prot-Hex1-e150), o deslocamento subiu para 53,07 mm (+2,2%), mantendo-se próximo ao valor inicial da Prot-Hex1. No entanto, a capacidade de carga aumentou significativamente para 819,56 kN (+13,6%), sugerindo que esse intervalo proporcionou um equilíbrio adequado entre rigidez e resistência estrutural. A redistribuição das tensões foi mais uniforme, e as zonas críticas ao redor das bordas angulares dos alvéolos foram reduzidas.

No espaçamento de 200 mm (Prot-Hex1-e200), o deslocamento máximo aumentou para 77,72 mm (+49,7%), indicando uma redução significativa na rigidez estrutural. Esse valor reflete que, apesar do maior espaçamento ter permitido ganhos na capacidade de carga, a redução da área resistente efetiva resultou em maiores deformações. No entanto, a capacidade de carga alcançou



seu valor mais elevado, atingindo 862,15 kN (+19,5%), superando todos os outros espaçamentos analisados. Esse desempenho sugere que o espaçamento maior favoreceu a máxima capacidade de carga global da viga.

A Tabela 6.55 apresenta os resultados das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais, ilustradas nas Figuras 6.61, 6.57 e 6.58, respectivamente, avaliando os efeitos de diferentes espaçamentos (120 mm, 150 mm e 200 mm).

As tensões Von Mises diminuíram progressivamente com o aumento do espaçamento entre os alvéolos. A configuração inicial (Prot-Hex1) apresentou o maior valor (460,5 MPa, +12%), indicando alta concentração de tensões ao redor das bordas e vértices dos alvéolos hexagonais. Com espaçamentos maiores, as tensões reduziram para 438,6 MPa (+7%) em 120 mm, 440,5 MPa (+7%) em 150 mm, e 434,3 MPa (+6%) em 200 mm, mostrando uma melhora clara na redistribuição das tensões estruturais, com o espaçamento de 200 mm apresentando o melhor desempenho.

As tensões longitudinais (S11) mantiveram-se praticamente constantes entre todas as configurações, variando entre 471,4 MPa (+5%) e 473,0 MPa (+5%). Isso indica que as tensões longitudinais são pouco influenciadas pela variação no espaçamento entre os alvéolos hexagonais, mantendo-se estáveis mesmo com alterações no intervalo.

As tensões cisalhantes (S12), por outro lado, foram mais sensíveis à variação no espaçamento. A configuração inicial (Prot-Hex1) apresentou um valor elevado de 263,6 MPa (+33%), refletindo zonas críticas de concentração de tensões cisalhantes. Com espaçamentos maiores, houve uma redução significativa: 252,5 MPa (+28%) em 120 mm, 253,3 MPa (+28%) em 150 mm, e 246,4 MPa (+25%) em 200 mm, sendo este último o mais eficiente na mitigação das tensões cisalhantes.

Em resumo, a análise mostra que o aumento do espaçamento entre os alvéolos hexagonais reduz efetivamente as tensões Von Mises e cisalhantes, enquanto as tensões longitudinais permanecem praticamente inalteradas. O espaçamento de 200 mm (Prot-Hex1-e200) apresentou os melhores resultados, com menores concentrações de tensões Von Mises e cisalhantes, aproximando-se do comportamento observado na viga padrão. Assim, para

otimizar o desempenho estrutural, espaçamentos maiores entre os alvéolos hexagonais são recomendados, garantindo melhor redistribuição dos esforços e maior eficiência global da estrutura.

Tabela 6.55 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449	-	197,8	-
18	Prot-Hex1	460,5	+12%	472,3	+5%	263,6	+33%
42	Prot-Hex1-e120	438,6	+7%	471,4	+5%	252,5	+28%
43	Prot-Hex1-e150	440,5	+7%	473	+5%	253,3	+28%
44	Prot-Hex1-e200	434,3	+6%	472,1	+5%	246,4	+25%

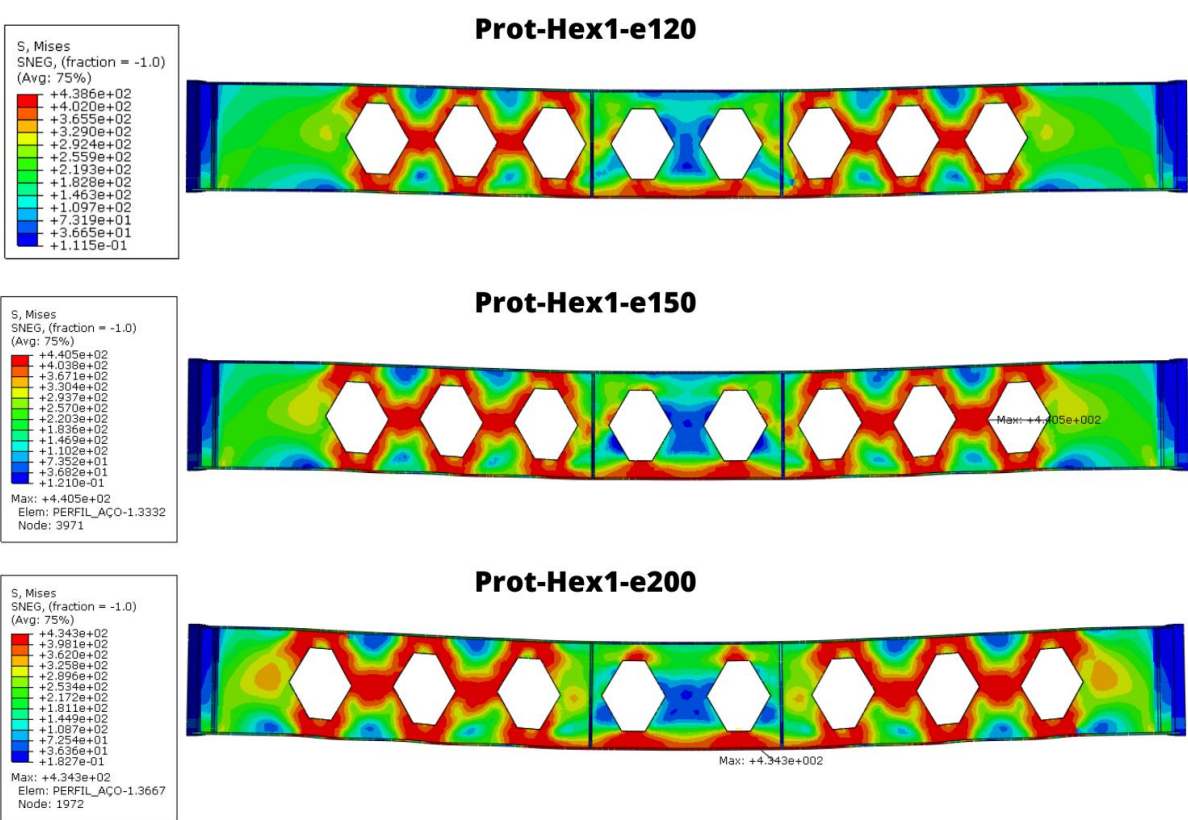


Figura 6.61 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

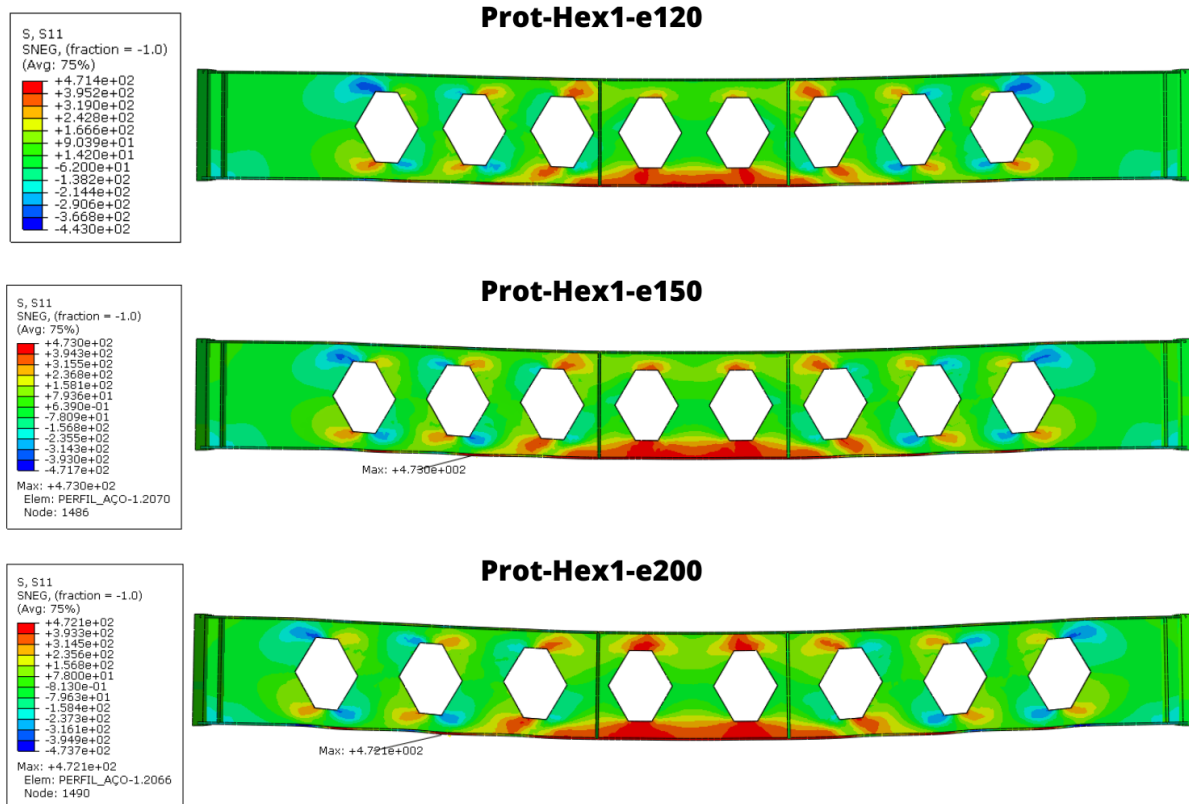


Figura 6.62 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

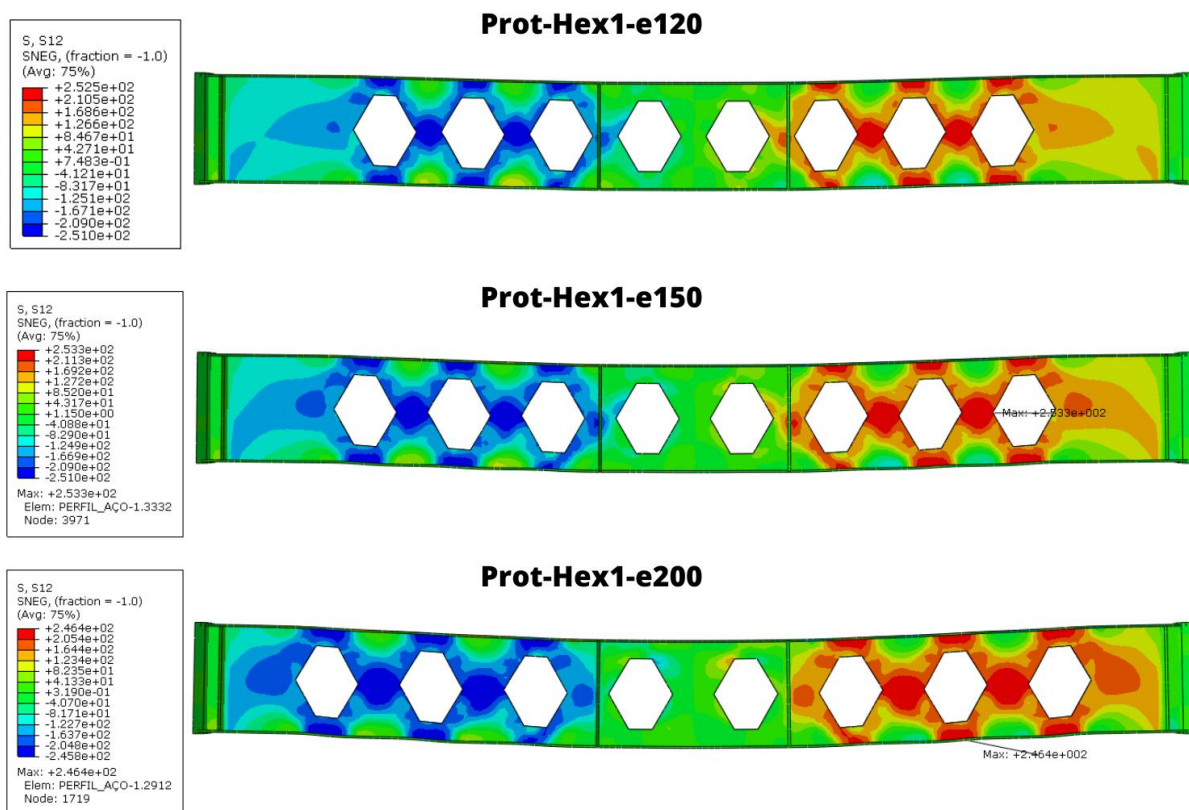


Figura 6.63 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais espaçados.

## 6.6 REMOÇÃO DE ALVÉOLOS NA ViMAP

Neste tópico, será analisada a influência da remoção dos alvéolos localizados nas extremidades das vigas mistas protendidas sobre o desempenho estrutural global. Serão utilizadas as vigas Prot-Hex1 (alvéolos hexagonais) e Prot-Circ1 (alvéolos circulares) como referência para este estudo. Inicialmente, será removido um alvéolo de cada extremidade, e, em seguida, mais um alvéolo será retirado, totalizando a remoção de dois alvéolos em cada ponta.

As nomenclaturas dos modelos estão na Tabela 6.56 e as ilustrações estão na Figura 6.64.

A remoção estratégica dos alvéolos tem como objetivo reduzir as concentrações críticas de tensões que geralmente ocorrem nas regiões próximas aos apoios, onde os esforços são mais intensos.

A análise comparativa avaliará parâmetros como deslocamento máximo, carga máxima suportada, tensões estruturais e peso final da viga, buscando identificar os efeitos positivos e limitações dessa estratégia de remoção seletiva de alvéolos.

Tabela 6.56 -Indicação das vigas modeladas removendo alvéolos.

<b>Formato</b>	<b>Tradicional</b>	<b>-2 alvéolos</b>	<b>-4 alvéolos</b>
Padrão	Prot-Padrão		
Círculo 1	Prot-Circ1	Prot-Circ1-2alv	Prot-Circ1-4alv
Hexágono 1	Prot-Hex1	Prot-Hex1-2alv	Prot-Hex1-4alv

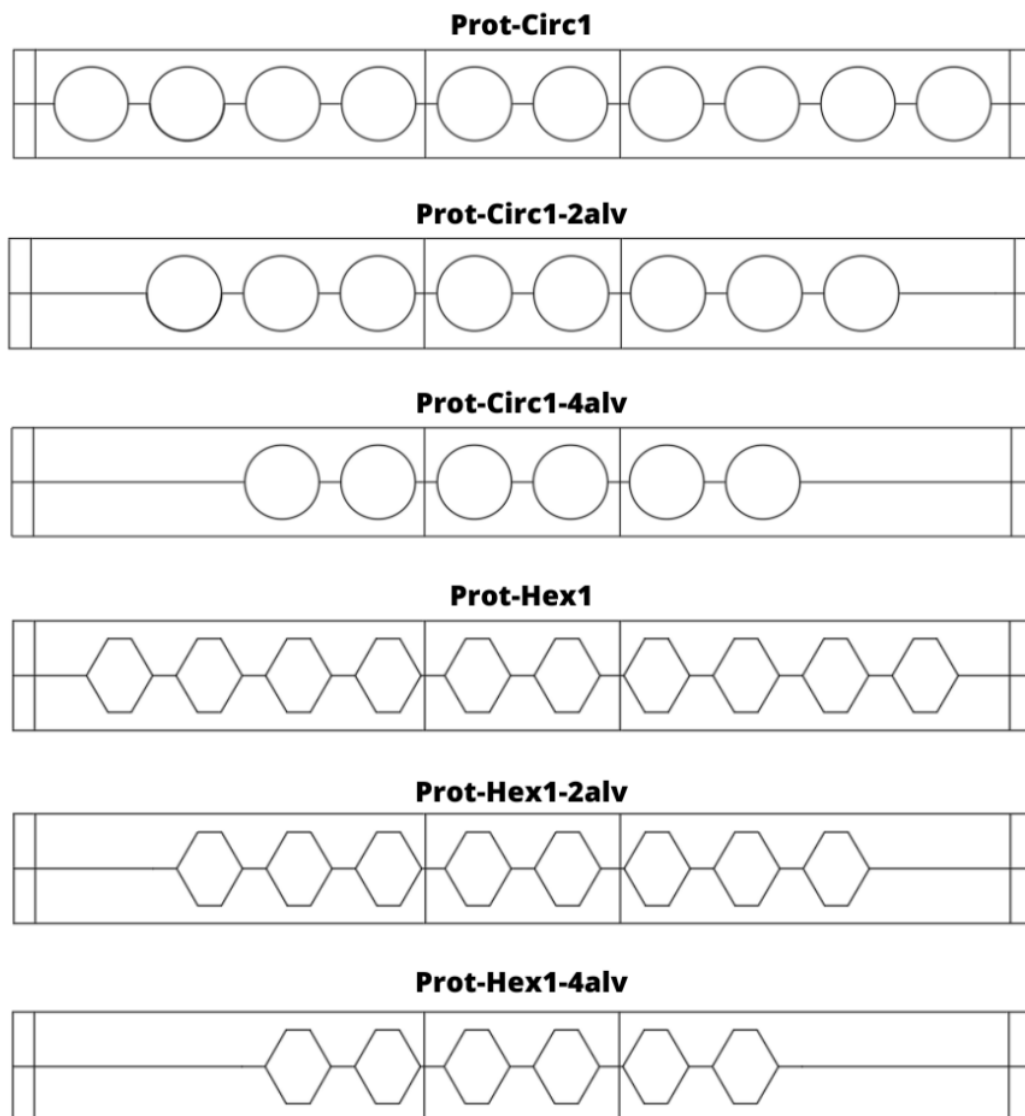


Figura 6.64 - Ilustração das vigas com alvéolos circulares e hexagonais com alvéolos removidos.

### 6.6.1 Alvéolos Circulares

Analisando a influência da remoção dos alvéolos circulares das extremidades nas vigas mistas protendidas Prot-Circ1. Inicialmente, será retirada uma abertura em cada extremidade, seguida pela remoção de mais uma abertura adicional. O objetivo é avaliar como essa modificação afeta parâmetros como deslocamento máximo e capacidade de carga (Figura 6.65 e Tabela 6.57), e a distribuição de tensões, buscando entender se a eliminação dos alvéolos nas regiões críticas pode melhorar o desempenho estrutural geral da viga.

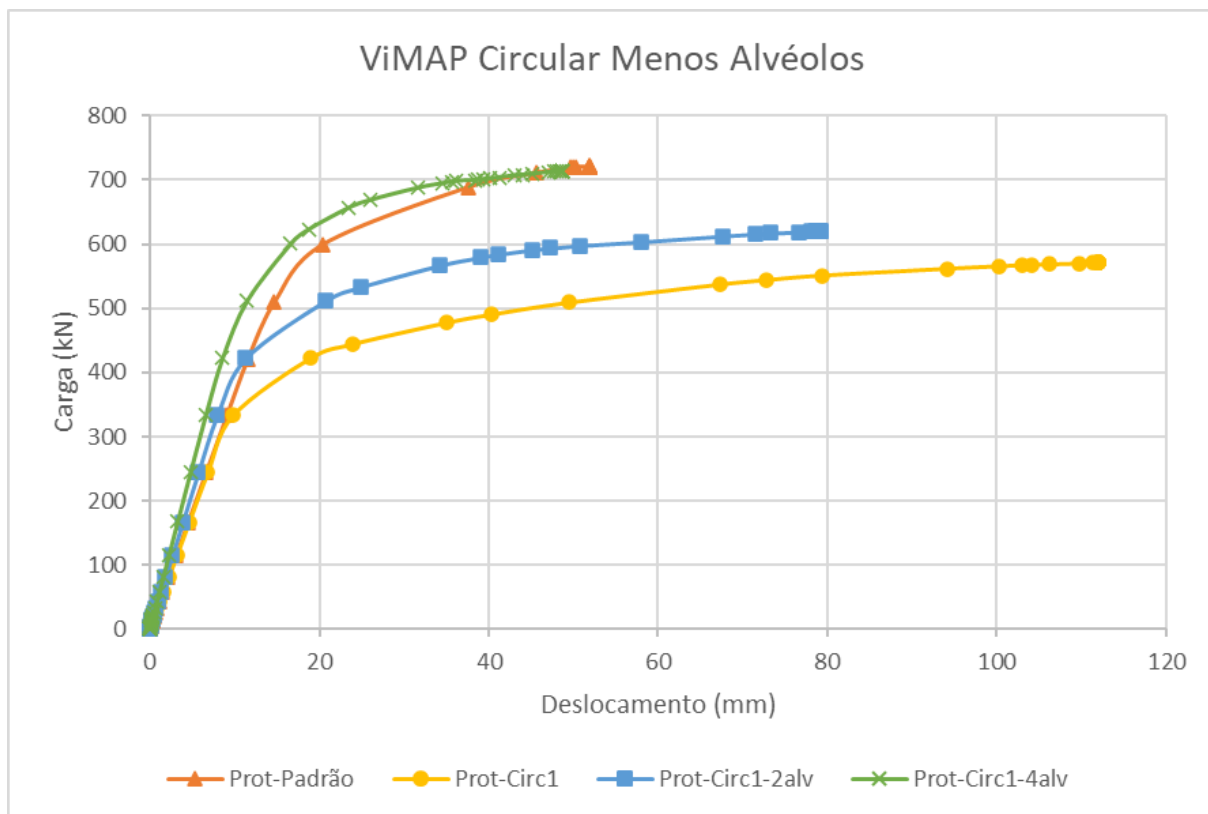


Figura 6.65 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs removendo alvéolos circulares

Tabela 6.57 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
15	Prot-Circ1	112,04	+115,7%	570,77	-20,9%
45	Prot-Circ1-2alv	79,23	+52,6%	620,26	-14,0%
46	Prot-Circ1-4alv	48,76	-6,1%	713,95	-1,0%

Inicialmente, a viga Prot-Circ1, com alvéolos circulares distribuídos ao longo de toda sua extensão, apresentou um deslocamento máximo de 112,04 mm (+115,7%) em comparação à viga padrão, acompanhado de uma redução de 20,9% na carga máxima suportada (570,77 kN).

Após a remoção de dois alvéolos nas extremidades (Prot-Circ1-2alv), houve uma redução significativa no deslocamento máximo, que caiu para 79,23 mm (+52,6%), evidenciando uma melhora substancial na rigidez estrutural. A capacidade de carga também aumentou para 620,26 kN (-14,0%), representando um ganho expressivo em relação à Prot-Circ1. Isso indica que a remoção dos alvéolos próximos aos apoios reduziu concentrações críticas de tensões e melhorou a distribuição dos esforços ao longo da viga.

Com a remoção de mais dois alvéolos (Prot-Circ1-4alv), os resultados foram ainda mais expressivos. O deslocamento máximo foi reduzido para 48,76 mm (-6,1%), um valor muito próximo ao da viga padrão, sugerindo uma recuperação quase total da rigidez original. Além disso, a carga máxima suportada aumentou para 713,95 kN (-1,0%), aproximando-se também do desempenho da viga padrão. Esse comportamento confirma que a remoção dos alvéolos nas extremidades minimizou os efeitos negativos das aberturas circulares, especialmente nas zonas críticas de apoio.

Em conclusão, a estratégia de remoção progressiva dos alvéolos circulares nas extremidades demonstrou ser altamente eficaz para melhorar o desempenho estrutural das vigas mistas protendidas. A redução significativa nos deslocamentos e a recuperação quase total da capacidade de carga ressaltam que os alvéolos localizados nas extremidades têm impacto direto no comportamento global da estrutura. Essa abordagem pode ser uma solução prática para otimizar vigas com aberturas circulares, equilibrando eficiência estrutural e economia de material.

A Tabela 6.58 e as Figuras 6.66, 6.58 e 6.59 disponibilizam informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

No que diz respeito às tensões Von Mises, observa-se uma redução progressiva à medida que os alvéolos são removidos das extremidades. A viga Prot-Circ1, com alvéolos distribuídos ao longo de toda a extensão, apresentou uma tensão máxima de 478,6 MPa (+16%), evidenciando concentrações críticas de tensões ao redor das aberturas, principalmente nas regiões próximas aos apoios. Com a remoção de dois alvéolos (Prot-Circ1-2alv), houve uma redução para 469,6 MPa (+14%), sugerindo uma redistribuição mais eficiente dos esforços e um alívio parcial das tensões nas regiões críticas. Após a remoção de quatro alvéolos (Prot-Circ1-4alv), a tensão Von Mises caiu para 453,6 MPa (+10%), aproximando-se do comportamento da viga padrão. Esse

resultado indica que a ausência de aberturas nas extremidades reduz significativamente as zonas de concentração de esforços, proporcionando uma melhora expressiva no desempenho estrutural.

As tensões longitudinais (S11), que representam os esforços ao longo do eixo principal da viga, exibiram variações menos expressivas em comparação às tensões Von Mises. A viga Prot-Circ1 apresentou uma tensão longitudinal de 472,1 MPa (+5%), indicando que os alvéolos circulares resultaram em um leve aumento nas tensões longitudinais devido à redução de material resistente. Com a remoção de dois alvéolos (Prot-Circ1-2alv), as tensões longitudinais praticamente não sofreram alteração significativa, permanecendo em 471,7 MPa (+5%). Mesmo após a remoção de quatro alvéolos (Prot-Circ1-4alv), os valores mantiveram-se estáveis, registrando 473,0 MPa (+5%).

As tensões cisalhantes (S12) foram as mais sensíveis às alterações introduzidas pela remoção dos alvéolos. A viga Prot-Circ1 apresentou uma tensão cisalhante de 263,2 MPa (+33%), evidenciando um aumento significativo em comparação à viga padrão. Isso ocorre devido às zonas críticas de concentração de esforços cisalhantes que surgem ao redor das bordas das aberturas circulares. Com a remoção de dois alvéolos (Prot-Circ1-2alv), as tensões cisalhantes sofreram uma redução leve, para 262,3 MPa (+33%), sugerindo que a redistribuição dos esforços ocorreu de forma moderada. No entanto, após a remoção de quatro alvéolos (Prot-Circ1-4alv), houve uma redução mais significativa para 256,1 MPa (+29%), refletindo uma melhora expressiva na redistribuição dos esforços cisalhantes, especialmente nas regiões próximas aos apoios.

De maneira geral, a remoção progressiva dos alvéolos circulares nas extremidades demonstrou ser uma estratégia eficaz para mitigar as concentrações críticas de tensões, especialmente nas componentes Von Mises e cisalhantes. A medida mostrou-se menos relevante para as tensões longitudinais (S11), que permaneceram praticamente estáveis ao longo das diferentes configurações. Com a remoção de quatro alvéolos (Prot-Circ1-4alv), a viga apresentou um comportamento estrutural mais equilibrado, com redução expressiva nas tensões Von Mises e cisalhantes, aproximando-se do desempenho observado na viga padrão.

Em conclusão, a análise reforça que os alvéolos localizados nas extremidades das vigas protendidas têm um impacto direto no comportamento estrutural global, especialmente nas



tensões Von Mises e cisalhantes. A remoção seletiva dessas aberturas resultou em melhora na redistribuição das tensões, redução dos pontos críticos de concentração de esforços e maior estabilidade estrutural. Dessa forma, a estratégia de remoção dos alvéolos nas extremidades representa uma abordagem eficiente para otimizar o desempenho estrutural das vigas protendidas com alvéolos circulares.

Tabela 6.58 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
15	Prot-Circ1	478,6	+16%	472,1	+5%	263,2	+33%
45	Prot-Circ1-2alv	469,6	+14%	471,7	+5%	262,3	+33%
46	Prot-Circ1-4alv	453,6	+10%	473,0	+5%	256,1	+29%

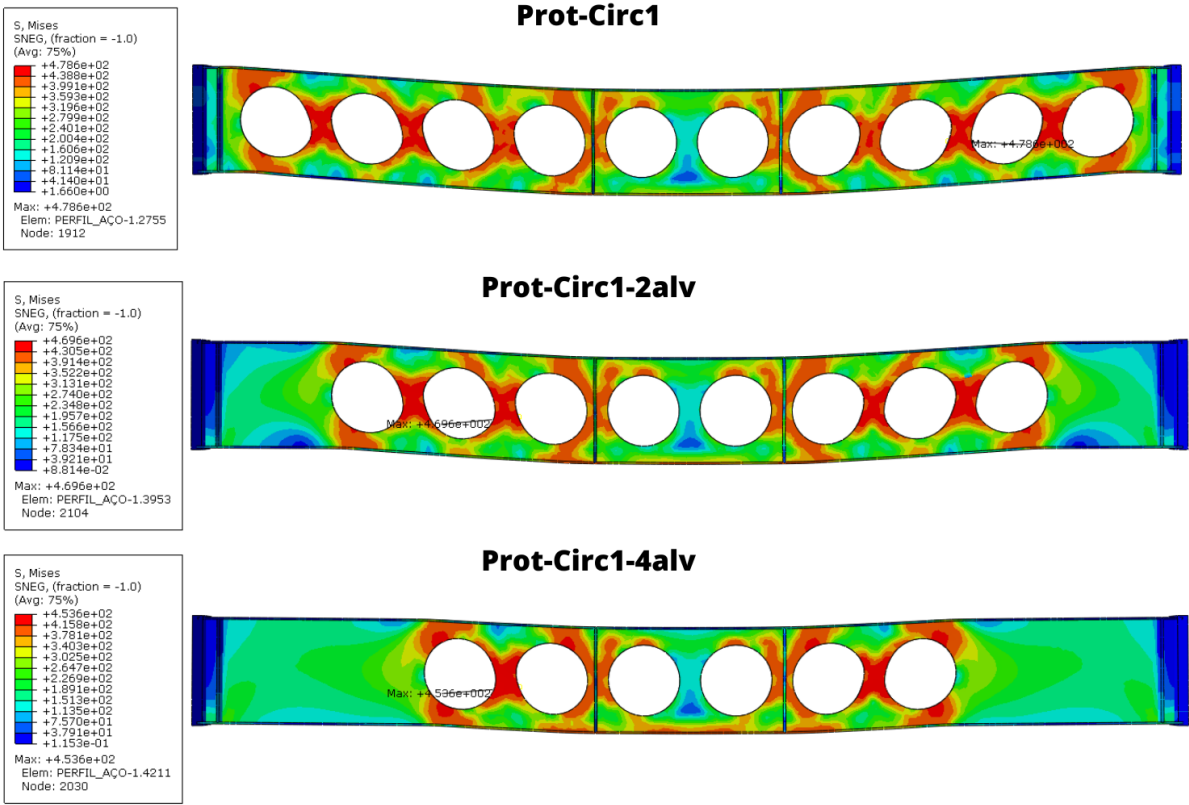


Figura 6.66 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.

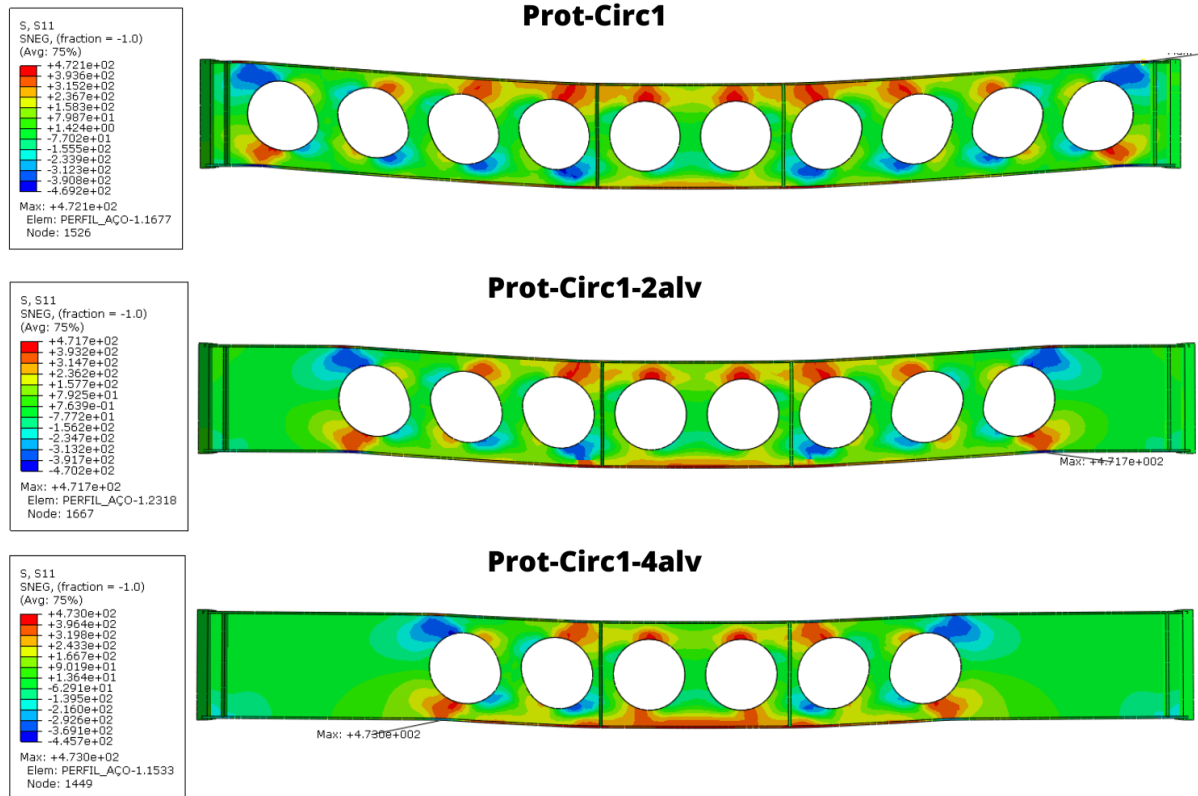


Figura 6.67 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.

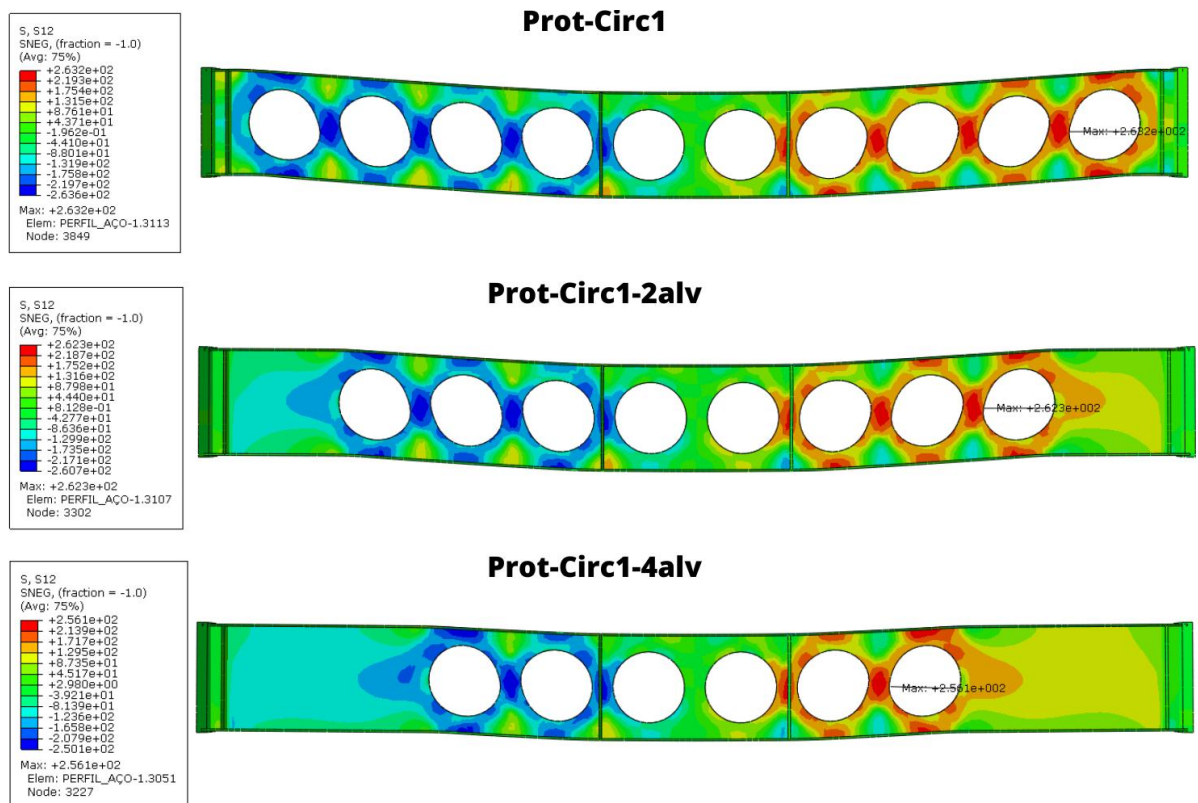


Figura 6.68 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos circulares.

### 6.6.2 Alvéolos Hexagonais

Neste subtópico, será analisado o comportamento estrutural das vigas mistas protendidas com alvéolos hexagonais (Prot-Hex1) após a remoção seletiva de alvéolos nas extremidades. Inicialmente, será retirada uma abertura hexagonal em cada extremidade da viga, seguida pela remoção de mais uma abertura adicional em cada ponta.

A análise comparativa abordará os parâmetros principais, incluindo deslocamento máximo e carga máxima suportada (Figura 6.69 e Tabela 6.59), tensões Von Mises, longitudinais (S11) e cisalhantes (S12). O objetivo é avaliar como a remoção progressiva dos alvéolos hexagonais influencia o desempenho estrutural global e se essa estratégia pode ser considerada uma solução eficaz para otimizar a rigidez, resistência e eficiência das vigas mistas protendidas.

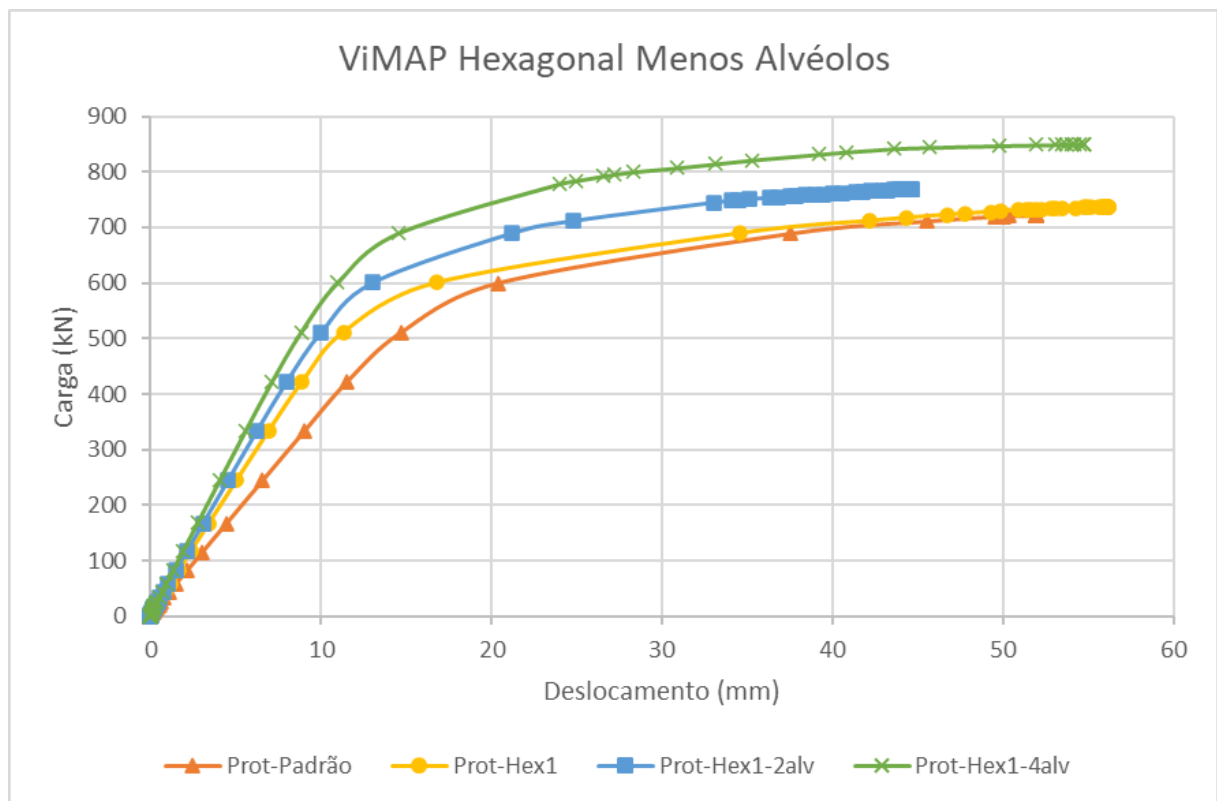


Figura 6.69 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.

Tabela 6.59 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
14	Prot-Padrão	51,93	-	721,18	-
18	Prot-Hex1	56,23	8,3%	737,09	2,2%
47	Prot-Hex1-2alv	44,66	-14,0%	769,82	6,7%
48	Prot-Hex1-4alv	54,76	5,4%	849,66	17,8%

Inicialmente, a Prot-Hex1, com alvéolos distribuídos uniformemente ao longo de toda a viga, apresentou um deslocamento de 56,23 mm (+8,3%) e uma carga máxima suportada de 737,09 kN (+2,2%). Esses valores indicam que, apesar da presença das aberturas hexagonais, a viga ainda manteve um bom nível de rigidez e uma leve melhora na capacidade de carga em comparação com a viga padrão. No entanto, observa-se que os vértices e as bordas anguladas dos alvéolos hexagonais favoreceram concentrações localizadas de tensões, que podem impactar negativamente o desempenho a longo prazo.

Com a remoção de dois alvéolos nas extremidades (Prot-Hex1-2alv), o deslocamento máximo sofreu uma redução significativa, caindo para 44,66 mm (-14,0%). Essa redução evidencia uma melhora expressiva na rigidez estrutural, já que as regiões próximas aos apoios, onde ocorrem os maiores esforços, passaram a contar com seções mais robustas e contínuas. Simultaneamente, a carga máxima suportada aumentou para 769,82 kN (+6,7%), representando um ganho significativo na capacidade resistente da viga. Esses resultados sugerem que a remoção dos alvéolos nas extremidades permitiu uma redistribuição mais uniforme dos esforços, reduzindo os pontos críticos de tensão.

Após a remoção de quatro alvéolos nas extremidades (Prot-Hex1-4alv), o deslocamento máximo aumentou ligeiramente para 54,76 mm (+5,4%), ainda abaixo do valor inicial da viga Prot-Hex1. Esse comportamento indica que, embora a remoção adicional tenha mantido a rigidez global elevada, a redistribuição dos esforços resultou em uma leve perda de eficiência na rigidez em comparação com a remoção de apenas dois alvéolos. Por outro lado, a carga máxima suportada aumentou de forma significativa para 849,66 kN (+17,8%), o que representa um ganho expressivo em relação à configuração inicial e à viga padrão. Esse aumento reflete

uma melhora significativa na capacidade de carga devido à eliminação dos pontos críticos de concentração de tensões nas extremidades.

Em conclusão, a remoção seletiva dos alvéolos hexagonais nas extremidades das vigas mistas protendidas demonstrou ser uma estratégia eficiente para melhorar o desempenho estrutural global. A remoção de dois alvéolos (Prot-Hex1-2alv) apresentou o melhor equilíbrio entre rigidez e capacidade de carga, com uma significativa redução no deslocamento máximo e um aumento consistente na resistência máxima. Já a remoção de quatro alvéolos (Prot-Hex1-4alv), embora tenha apresentado um leve aumento no deslocamento máximo em relação à configuração intermediária, resultou no maior ganho em capacidade de carga.

A Tabela 6.60 e as Figura 6.70, 6.62 e 6.63 disponibilizam informações sobre as distribuições de tensões Von Mises, longitudinais e cisalhantes, respectivamente.

Em relação às tensões Von Mises, observa-se uma redução progressiva à medida que os alvéolos hexagonais foram removidos das extremidades. A viga Prot-Hex1, com alvéolos distribuídos uniformemente ao longo de toda a sua extensão, apresentou uma tensão Von Mises de 460,5 MPa (+12%) em comparação à viga padrão. Esse aumento é atribuído às concentrações de tensões localizadas nas bordas e vértices dos alvéolos hexagonais, especialmente nas regiões próximas aos apoios. Com a remoção de dois alvéolos (Prot-Hex1-2alv), houve uma redução para 452,6 MPa (+10%), indicando uma redistribuição mais uniforme das tensões, com alívio parcial das concentrações críticas. Quando mais dois alvéolos foram removidos (Prot-Hex1-4alv), a tensão Von Mises reduziu para 447,1 MPa (+9%), aproximando-se dos valores observados na viga padrão.

No que diz respeito às tensões longitudinais (S11), os valores permaneceram praticamente constantes ao longo das diferentes configurações. A viga Prot-Hex1 apresentou uma tensão longitudinal de 472,3 MPa (+5%), um leve aumento em comparação à viga padrão, indicando uma distribuição estável das tensões ao longo do eixo longitudinal da viga, mesmo com a presença dos alvéolos hexagonais. Após a remoção de dois alvéolos (Prot-Hex1-2alv), o valor manteve-se praticamente inalterado em 472,6 MPa (+5%). Da mesma forma, com a remoção de mais dois alvéolos (Prot-Hex1-4alv), as tensões longitudinais alcançaram 472,8 MPa (+5%), evidenciando que a remoção dos alvéolos nas extremidades tem pouco impacto direto nessa componente de tensão.

As tensões cisalhantes (S12) foram as mais sensíveis às modificações estruturais introduzidas pela remoção seletiva dos alvéolos. Na configuração original (Prot-Hex1), as tensões cisalhantes atingiram 263,6 MPa (+33%), refletindo altas concentrações de tensões cisalhantes nas bordas anguladas e nos vértices das aberturas hexagonais, especialmente nas regiões próximas aos apoios. Com a remoção de dois alvéolos (Prot-Hex1-2alv), as tensões cisalhantes diminuíram ligeiramente para 261,0 MPa (+32%), sugerindo uma redistribuição parcial dos esforços cisalhantes e uma leve redução nas zonas críticas. Quando mais dois alvéolos foram removidos (Prot-Hex1-4alv), as tensões cisalhantes reduziram de forma mais expressiva, alcançando 256,5 MPa (+30%).

De maneira geral, a remoção seletiva dos alvéolos hexagonais nas extremidades das vigas mistas protendidas teve impacto mais significativo nas tensões Von Mises e cisalhantes, enquanto as tensões longitudinais permaneceram praticamente inalteradas. A redução das tensões Von Mises de 460,5 MPa (+12%) para 447,1 MPa (+9%) e das tensões cisalhantes de 263,6 MPa (+33%) para 256,5 MPa (+30%) reforça que a remoção das aberturas próximas aos apoios resultou em uma melhor redistribuição das tensões e menor concentração de esforços críticos.

Por outro lado, a estabilidade observada nas tensões longitudinais sugere que essa componente é menos influenciada pela presença ou ausência de alvéolos nas extremidades e está mais relacionada ao comportamento global da viga sob carregamento.

Em conclusão, a remoção progressiva dos alvéolos hexagonais nas extremidades das vigas mistas protendidas mostrou-se uma estratégia eficiente para mitigar as concentrações críticas de tensões Von Mises e cisalhantes, melhorando a eficiência estrutural global sem impactar negativamente as tensões longitudinais. A configuração com quatro alvéolos removidos (Prot-Hex1-4alv) apresentou os melhores resultados, aproximando-se do comportamento da viga padrão, com tensões mais equilibradas e uma distribuição mais homogênea dos esforços estruturais.

Esses resultados reforçam a importância de considerar a remoção seletiva de alvéolos em regiões críticas próximas aos apoios, especialmente em geometrias mais sensíveis, como os alvéolos hexagonais, para garantir maior rigidez, segurança e desempenho estrutural otimizado.

Tabela 6.60 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
14	Prot-Padrão	411,6	-	449,0	-	197,8	-
18	Prot-Hex1	460,5	12%	472,3	5%	263,6	33%
47	Prot-Hex1-2alv	452,6	10%	472,6	5%	261,0	32%
48	Prot-Hex1-4alv	447,1	9%	472,8	5%	256,5	30%

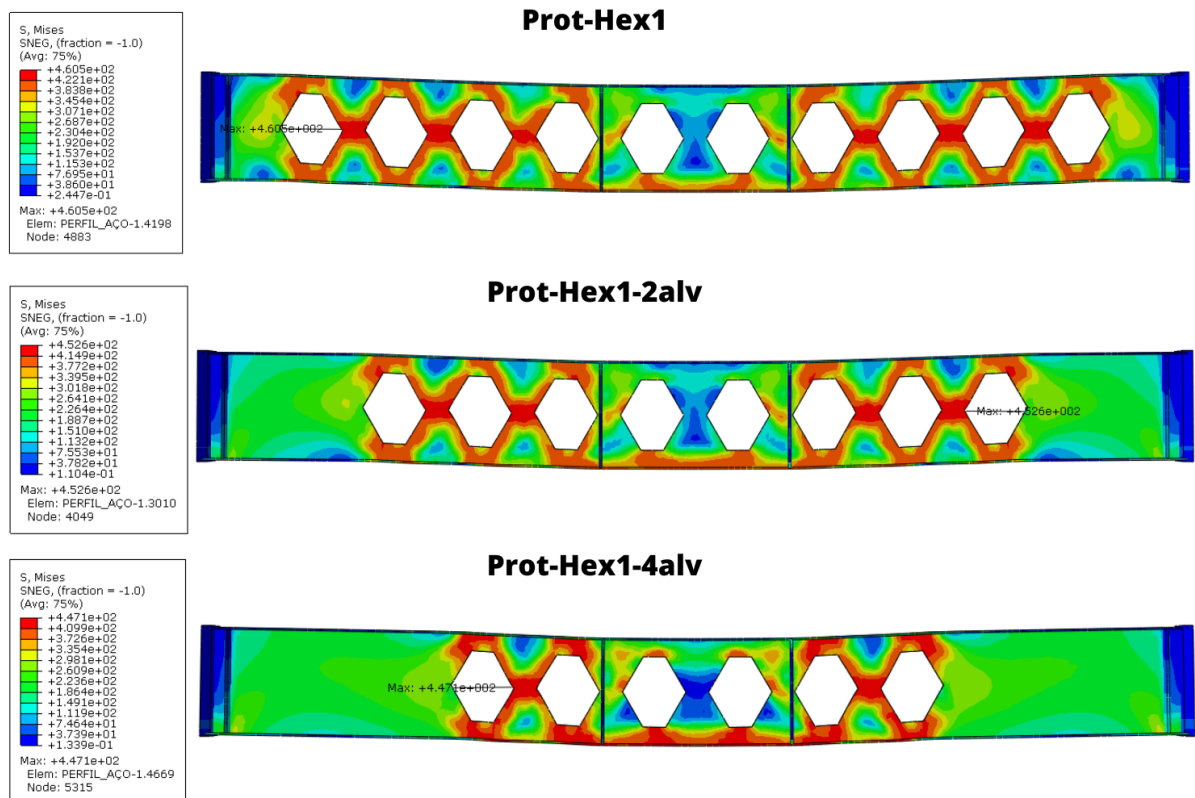


Figura 6.70 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.

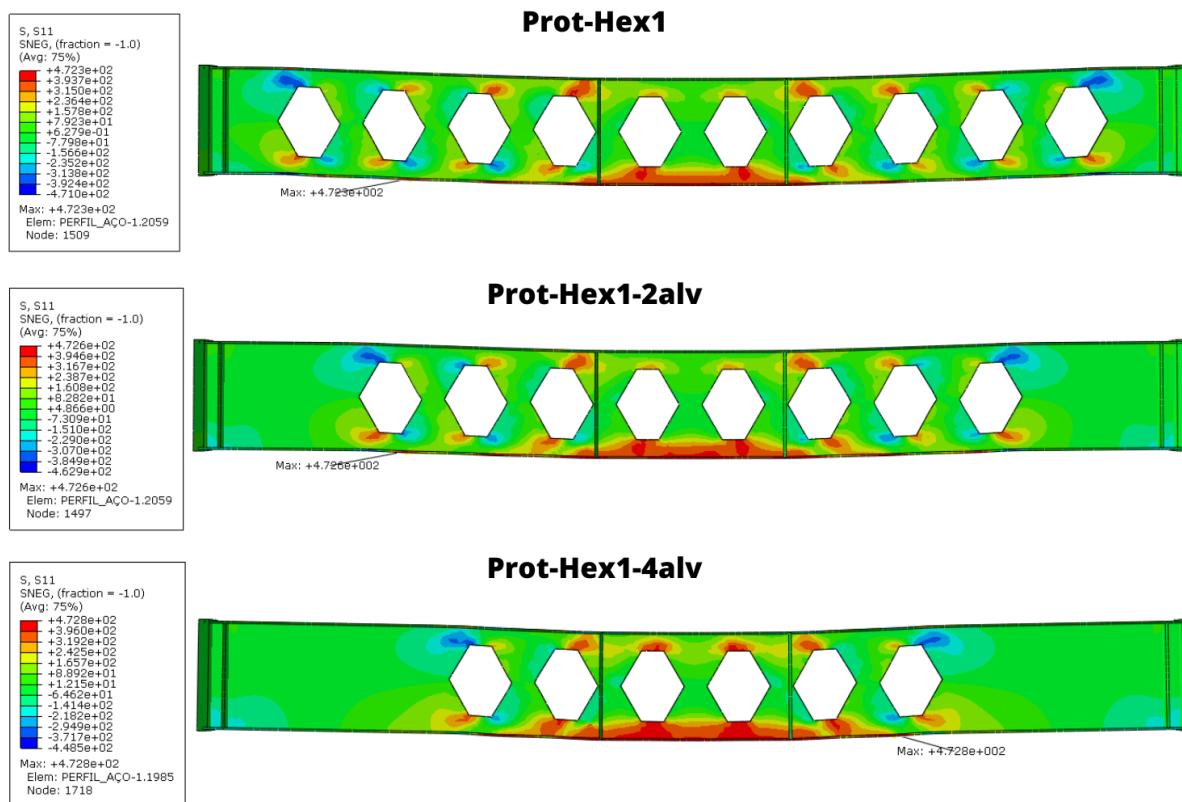


Figura 6.71 - Distribuição de tensão Longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.

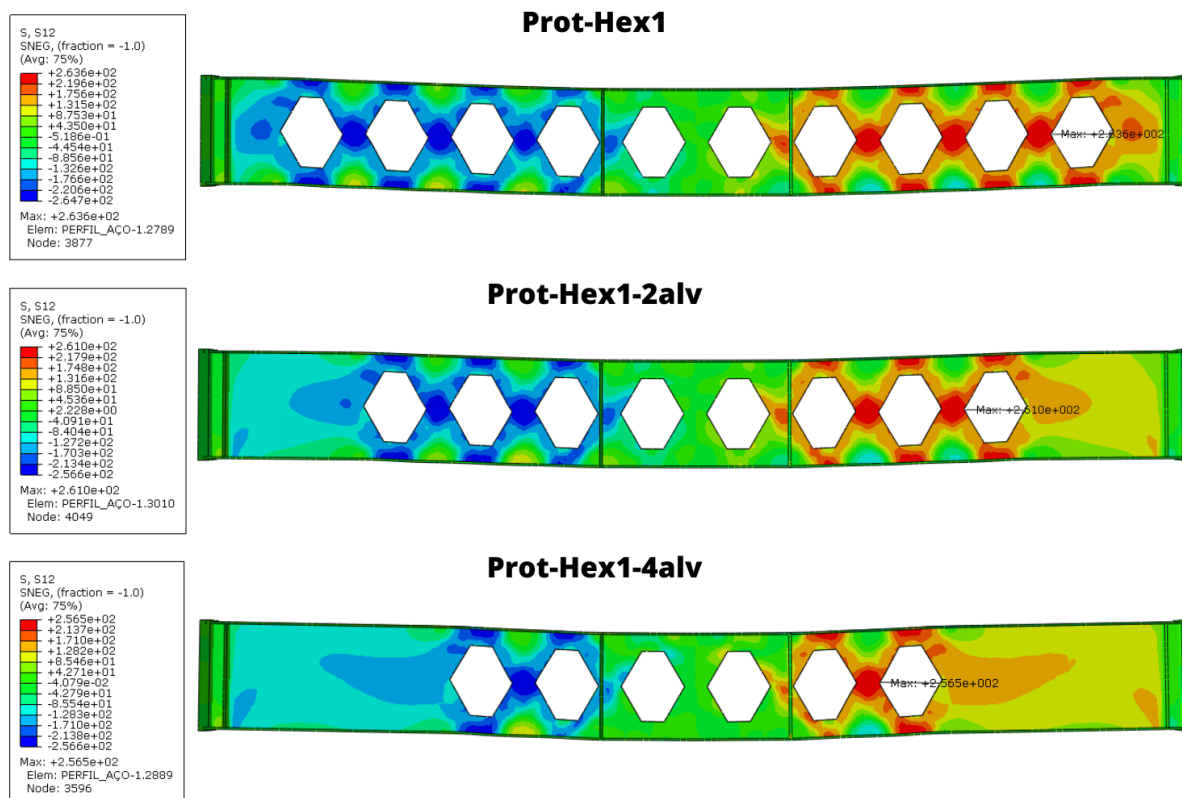


Figura 6.72 - Distribuição de tensão Cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs removendo alvéolos hexagonais.



## 6.7 PAR DE DESVIADORES COM POSIÇÕES VARIADAS NA ViMAP

Nesta etapa da análise das Vigas Mistas Alveolares Protendidas (ViMAPs), foi inserido um par adicional de desviadores ao longo da viga com o objetivo de aumentar a estabilidade e a rigidez do perfil de aço, na tentativa de otimizar a distribuição dos esforços e reduzir deslocamentos excessivos.

Foram definidas quatro diferentes posições para a inclusão dos desviadores, permitindo uma análise comparativa de seus efeitos estruturais. A Posição 1 corresponde à inserção dos desviadores entre os dois furos mais externos da viga, próximos às extremidades. A Posição 2 localiza os desviadores em furos mais internos, avançando em direção ao centro da viga. Esse padrão se repete nas Posições 3 e 4, sendo que, na última configuração, os desviadores foram posicionados exclusivamente no centro da viga.

Essa investigação busca identificar a melhor configuração para os desviadores intermediários, analisando seu impacto na rigidez, capacidade de carga e distribuição das tensões, fornecendo subsídios para um projeto mais eficiente de ViMAPs.

As vigas foram identificadas e nomeadas na Tabela 6.61, e suas dimensões especificadas nas Figura 6.73 e Figura 6.74, para os alvéolos circulares e hexagonais, respectivamente.

Tabela 6.61 -Indicação das vigas modeladas com par extra de desviadores.

<b>Formato</b>	<b>Círculo 1</b>	<b>Hexágono 1</b>
<b>Posição 1</b>	Prot-Circ1-Desv1	Prot-Hex1-Desv1
<b>Posição 2</b>	Prot-Circ1-Desv2	Prot-Hex1-Desv2
<b>Posição 3</b>	Prot-Circ1-Desv3	Prot-Hex1-Desv3
<b>Posição 4</b>	Prot-Circ1-Desv4	Prot-Hex1-Desv4

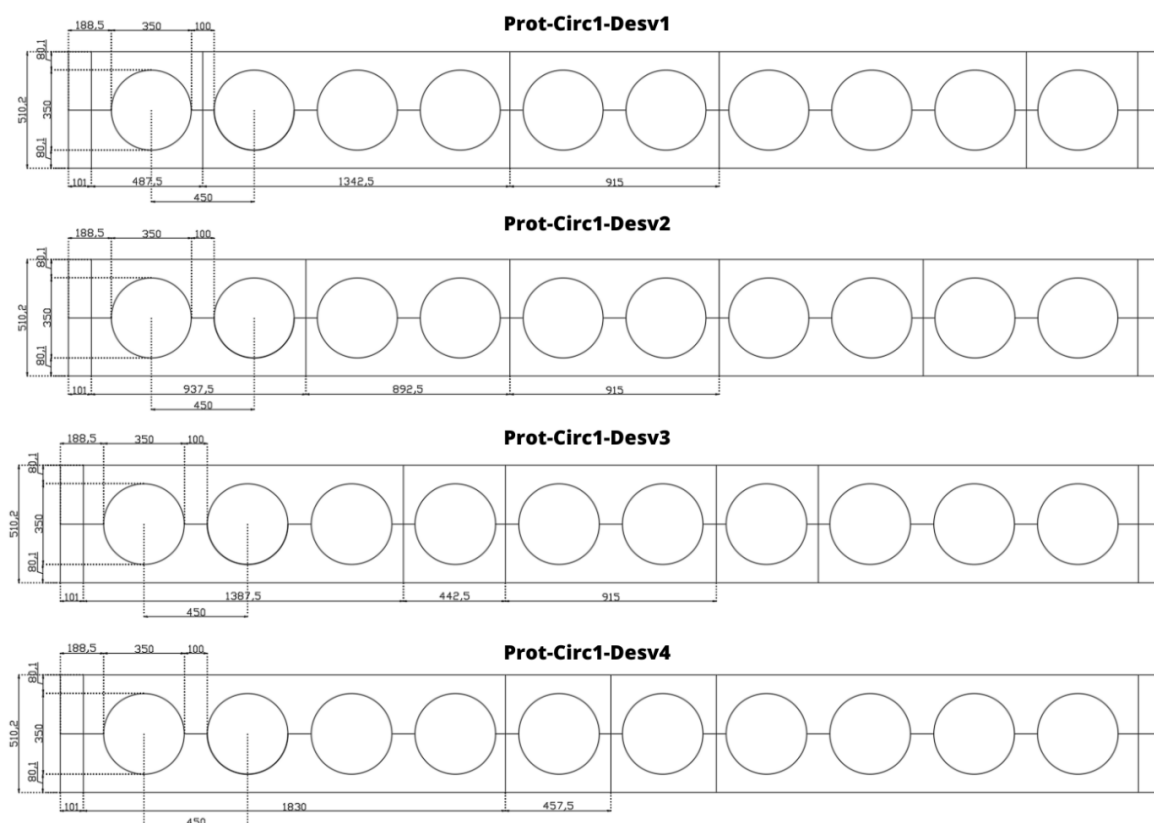


Figura 6.73 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares e um par de desviadores extras em posições variadas.

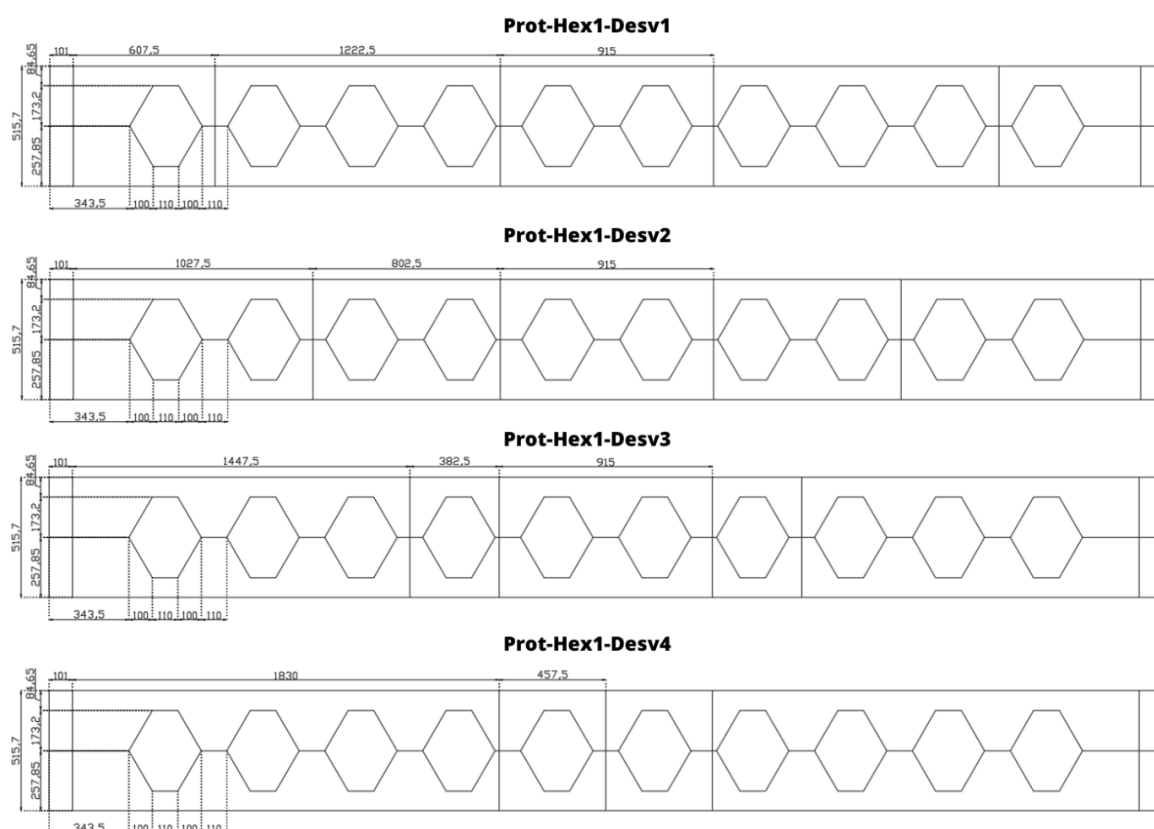


Figura 6.74 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras em posições variadas.

### 6.7.1 Alvéolos Circulares

A Figura 6.75 e a Tabela 6.62 apresentam a influência da adição de desviadores intermediários no comportamento estrutural das ViMAPs com alvéolos circulares, analisando diferentes posicionamentos desses elementos ao longo da viga.

A curva carga vs deslocamento da Figura 6.75 permitirá visualizar as diferenças no comportamento estrutural entre as configurações analisadas, enquanto a Tabela 6.62 apresenta os valores obtidos para deslocamento máximo e capacidade de carga em cada caso. Esse estudo busca identificar a posição mais eficiente dos desviadores, fornecendo diretrizes para um melhor aproveitamento estrutural das ViMAPs.

A viga Prot-Circ1 (sem desviadores adicionais) apresenta um deslocamento máximo de 112,04 mm e suporta uma carga máxima de 570,77 kN. Com a inclusão dos desviadores na Posição 1 (Prot-Circ1-Desv1), observa-se uma redução no deslocamento para 105,93 mm (-5,5%), enquanto a carga máxima aumenta para 593,34 kN (+4,0%). Esse resultado sugere uma melhora na rigidez estrutural e uma redistribuição mais eficiente das tensões.

Na Posição 2 (Prot-Circ1-Desv2), o deslocamento continua a diminuir, atingindo 102,65 mm (-8,4%), e a carga máxima se mantém próxima ao valor anterior (592,35 kN, +3,8%). Essa configuração demonstrou ser a mais eficiente, reduzindo significativamente o deslocamento e aumentando a resistência da viga.

A configuração da Posição 3 (Prot-Circ1-Desv3) apresentou uma redução de deslocamento menor em comparação às anteriores (106,96 mm, -4,5%) e uma carga máxima de 590,03 kN (+3,4%), indicando que a eficácia dos desviadores pode ser menor conforme se aproximam do centro da viga.

Na Posição 4 (Prot-Circ1-Desv4), onde o desviador está localizado exclusivamente no centro, os efeitos benéficos são praticamente anulados. O deslocamento máximo atinge 112,69 mm (+0,6%), praticamente o mesmo valor da viga sem desviadores, e a carga máxima se mantém 570,69 kN, sem ganhos significativos.

Os resultados mostram que a inserção de desviadores intermediários melhora a rigidez estrutural e a capacidade de carga das ViMAPs, especialmente quando posicionados nas regiões

externas da viga, isso acontece pois nas extremidades estão concentradas as tensões cisalhantes máximas, e com a inserção dos desviadores essas tensões migram para o centro da viga. A Posição 1 foi a mais eficiente, reduzindo significativamente o deslocamento e aumentando a capacidade de carga. Em contrapartida, quando os desviadores foram posicionados no centro da viga (Posição 4), os efeitos positivos foram praticamente anulados, sugerindo que a eficiência dos desviadores está mais associada às regiões de maior gradiente de tensão, pois no centro a tensão predominante é a longitudinal.

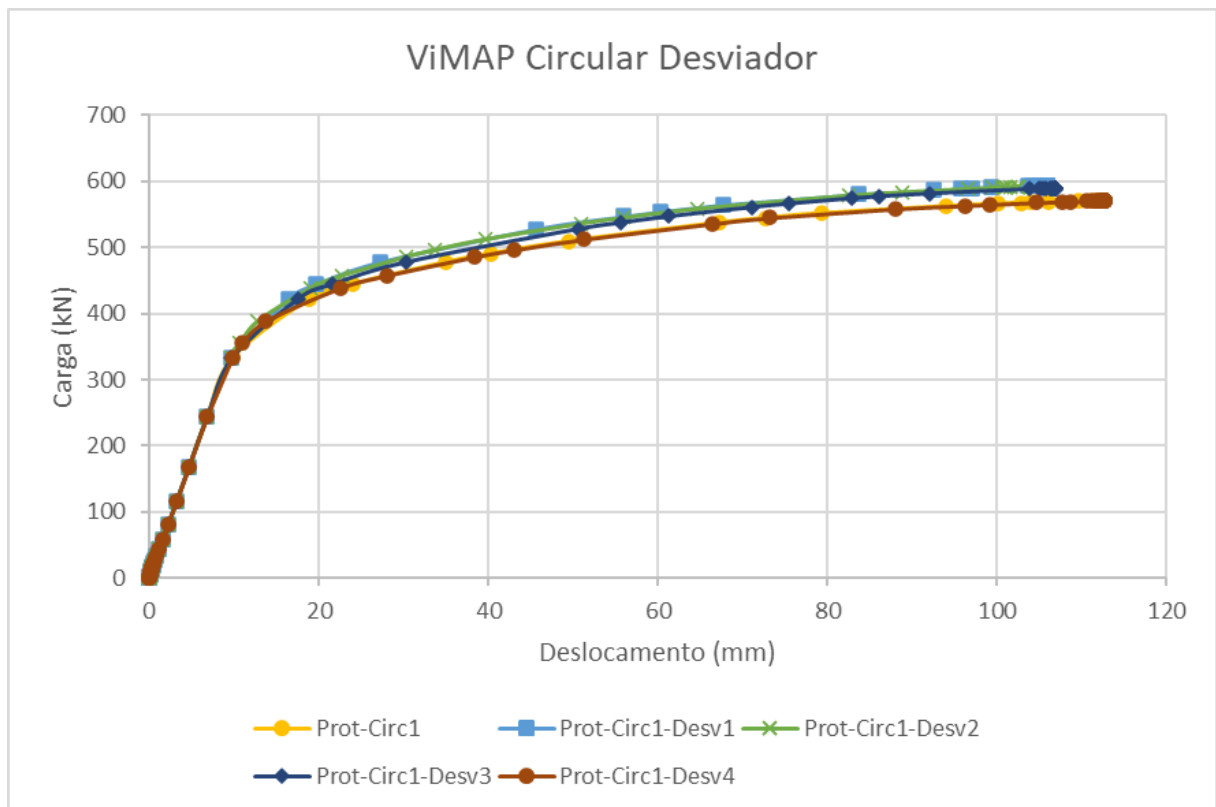


Figura 6.75 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.

Tabela 6.62 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
15	Prot-Circ1	112,04	-	570,77	-
49	Prot-Circ1-Desv1	105,93	-5,5%	593,34	+4,0%
50	Prot-Circ1-Desv2	102,65	-8,4%	592,35	+3,8%
51	Prot-Circ1-Desv3	106,96	-4,5%	590,03	+3,4%
52	Prot-Circ1-Desv4	112,69	+0,6%	570,69	0,0%

A Tabela 6.63 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos circulares e a influência da adição de par de desviadores extras em diferentes posições. Os resultados mostram variações sutis nas tensões máximas, indicando que a presença dos desviadores altera a distribuição dos esforços, mas sem mudanças expressivas nas tensões globais da estrutura.

As tensões Von Mises (Figura 6.76) variaram entre -1% e +1% em relação à viga sem desviadores (Prot-Circ1). As configurações Desv1 (-1%) e Desv2 (-1%) apresentaram uma ligeira redução das tensões Von Mises, indicando um leve alívio na concentração de tensões ao redor dos alvéolos. Por outro lado, as configurações Desv3 (+1%) e Desv4 (+1%) registraram aumento das tensões Von Mises, possivelmente devido a uma redistribuição menos eficiente dos esforços na região central da viga.

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.77) se mantiveram praticamente inalteradas em todas as configurações analisadas, demonstrando que a adição dos desviadores não afeta significativamente os esforços normais ao longo da viga.

As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.78) apresentaram pequenas variações, com reduções de até 2% para as configurações Desv1 e Desv2, sugerindo que os desviadores posicionados nas extremidades auxiliam na dissipação dos esforços cisalhantes, promovendo uma distribuição ligeiramente mais homogênea. Já a configuração Desv4 (+1%), com os desviadores

posicionados no centro da viga, apresentou um leve aumento na tensão cisalhante, o que pode indicar uma concentração maior de esforços nessa região.

Os resultados indicam que a adição de desviadores intermediários tem impacto sutil na distribuição das tensões máximas, com efeitos mais expressivos nas tensões cisalhantes (S12) do que nas tensões longitudinais (S11) ou Von Mises. As configurações Desv1 e Desv2, com desviadores posicionados próximos às extremidades, apresentaram melhor eficiência na redistribuição das tensões, resultando em ligeira redução das tensões Von Mises e cisalhantes. Por outro lado, a configuração Desv4, com desviadores no centro da viga, não trouxe benefícios significativos e pode ter contribuído para um aumento das tensões cisalhantes, reforçando a necessidade de um posicionamento estratégico para otimização do desempenho estrutural.

Tabela 6.63 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
15	Prot-Circ1	478,6	-	472,1	-	263,2	-
49	Prot-Circ1-Desv1	472,0	-1%	472,7	0%	258,7	-2%
50	Prot-Circ1-Desv2	474,3	-1%	472,1	0%	259,2	-2%
51	Prot-Circ1-Desv3	485,3	+1%	471,6	0%	261,4	-1%
52	Prot-Circ1-Desv4	483,2	+1%	471,8	0%	265,7	+1%

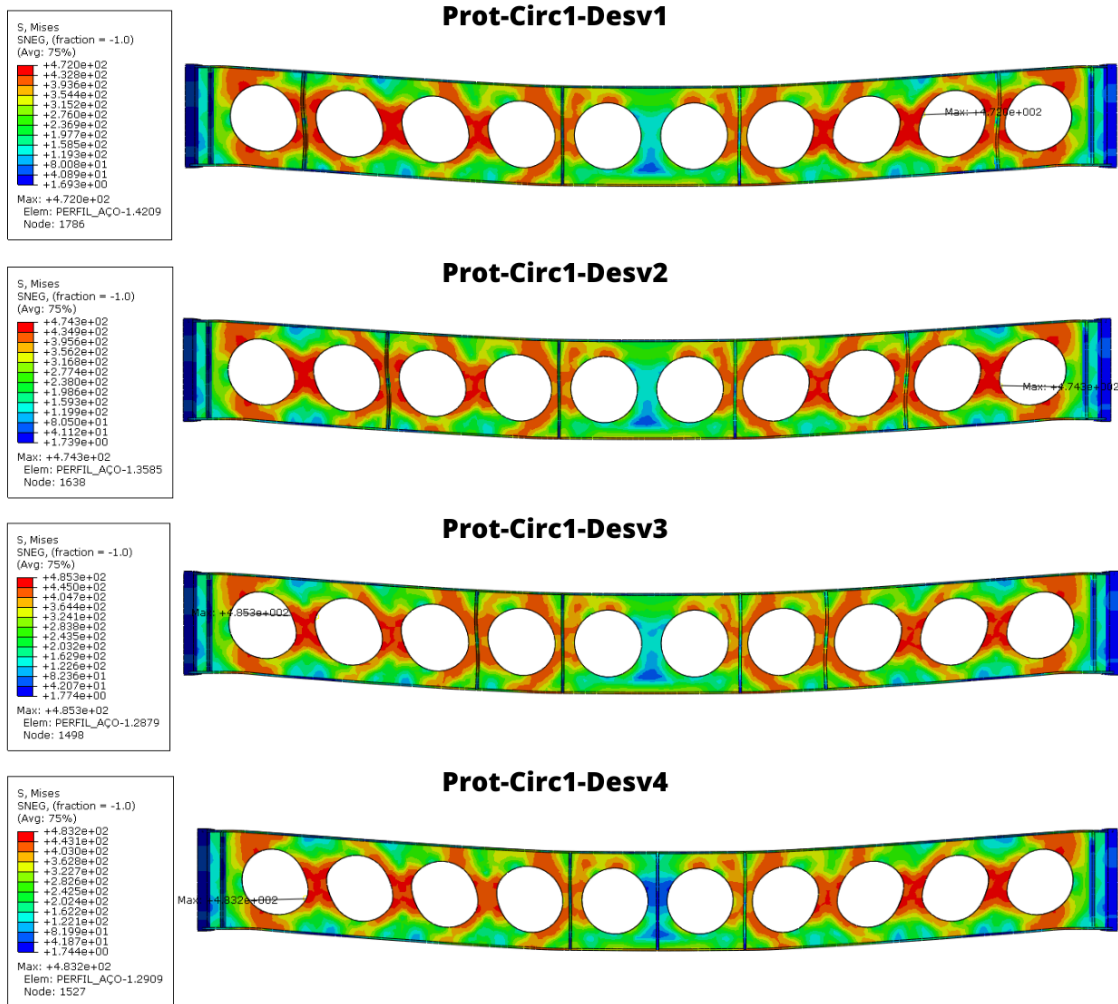


Figura 6.76 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.

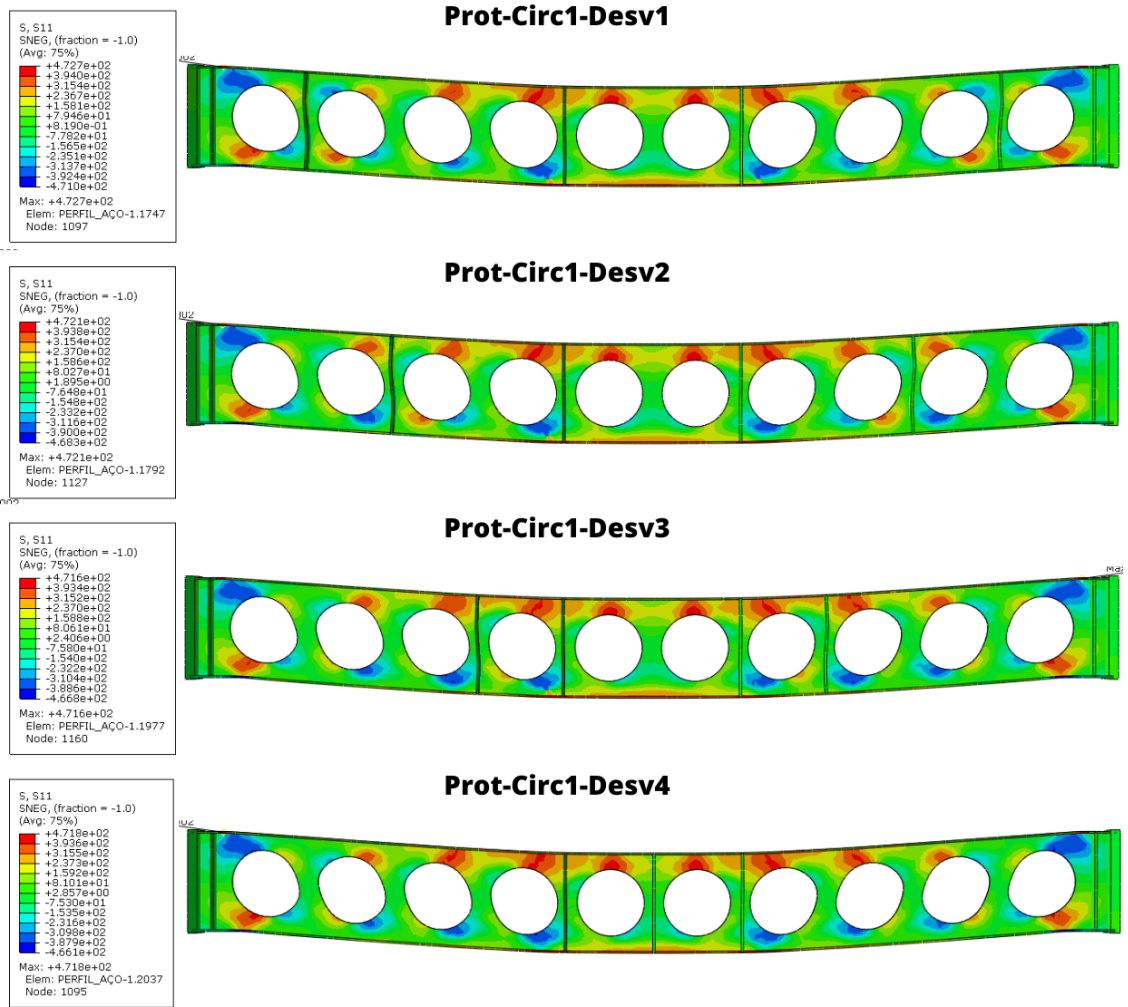


Figura 6.77 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.



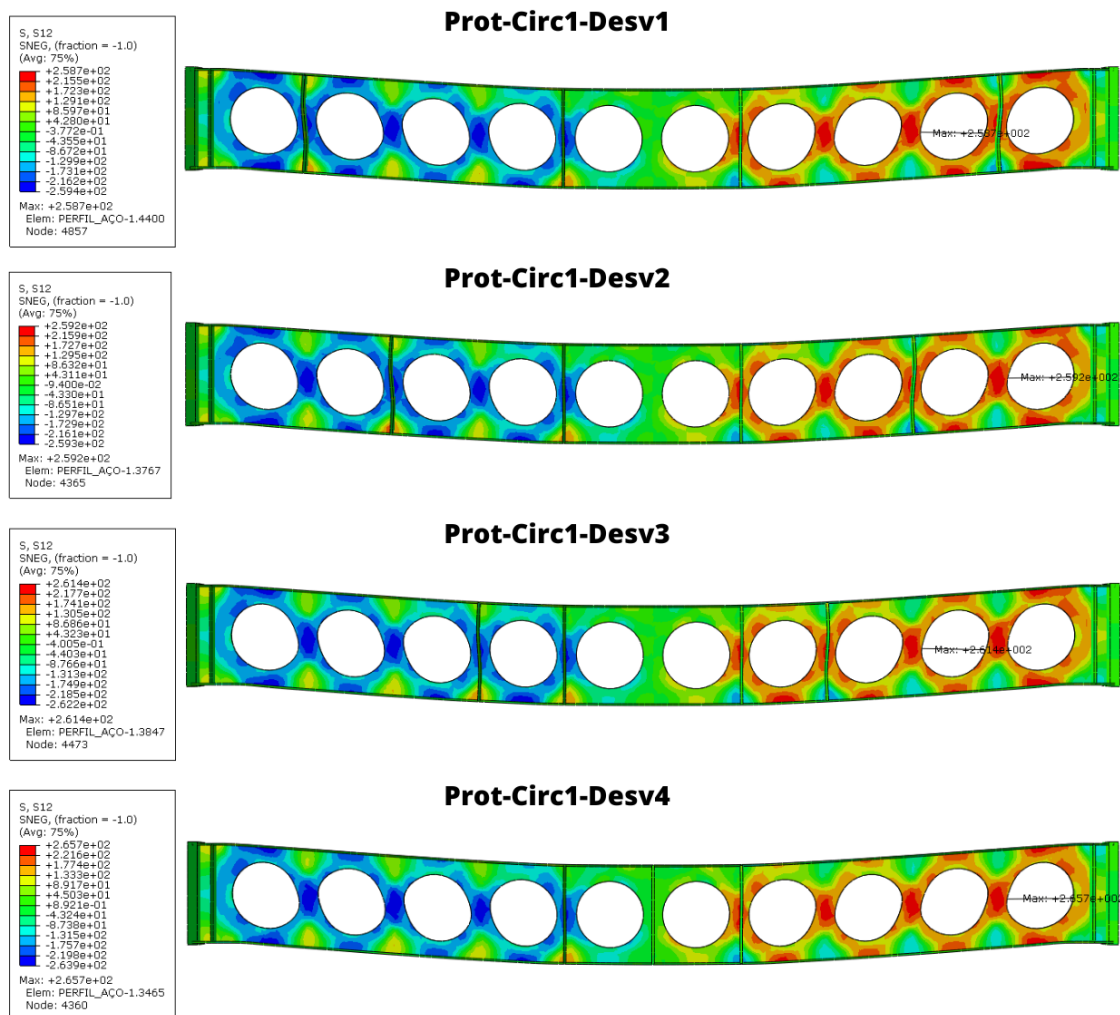


Figura 6.78 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares e par de desviadores extras com posições variadas.

## 6.7.2 Alvéolos Hexagonais

Para a análise da adição de desviadores intermediários no comportamento estrutural das ViMAPs com alvéolos hexagonais, a Figura 6.79 ilustra a curva carga vs deslocamento, enquanto a Tabela 6.64 apresenta os valores obtidos para deslocamento máximo e capacidade de carga em cada caso.

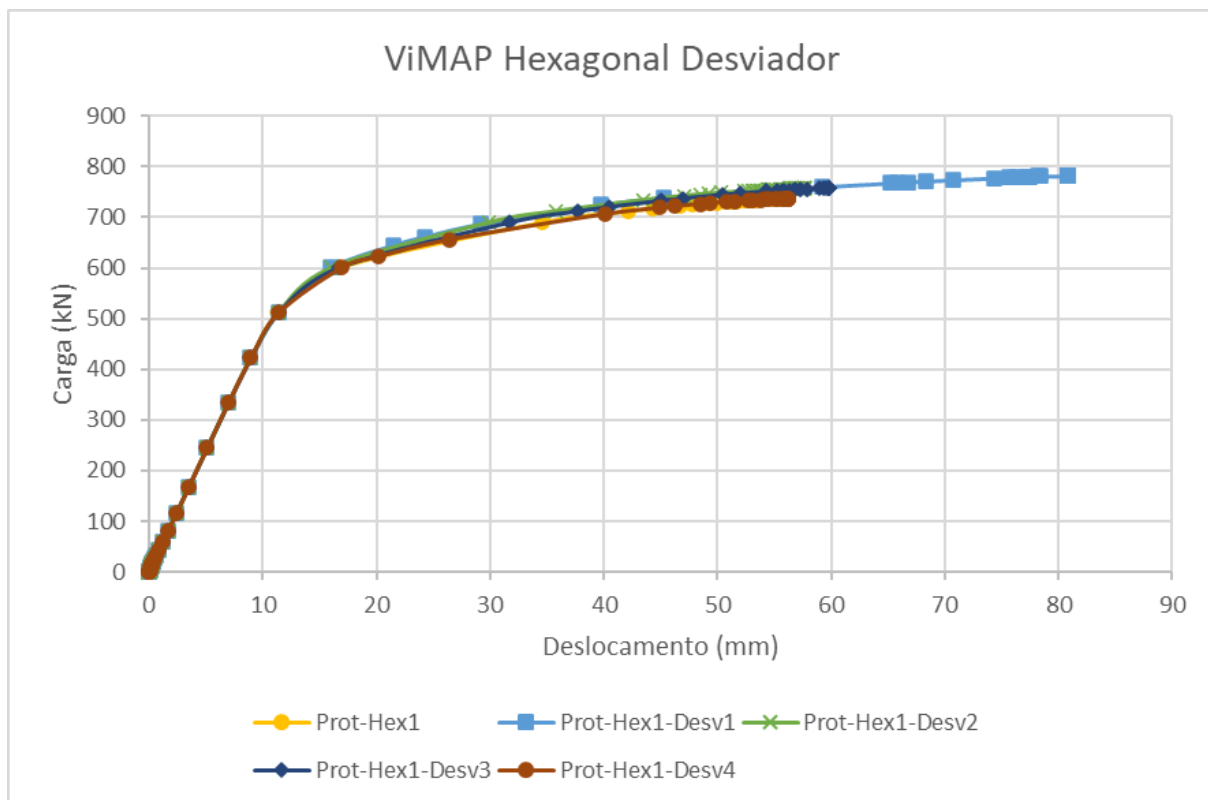


Figura 6.79 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

Tabela 6.64 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
18	Prot-Hex1	56,23	-	737,09	-
53	Prot-Hex1-Desv1	80,83	+43,8%	781,20	+6,0%
54	Prot-Hex1-Desv2	57,64	+2,5%	758,52	+2,9%
55	Prot-Hex1-Desv3	59,84	+6,4%	758,73	+2,9%
56	Prot-Hex1-Desv4	56,20	-0,1%	737,32	0,0%

A viga Prot-Hex1 (sem desviadores adicionais) apresentou um deslocamento máximo de 56,23 mm e uma capacidade de carga de 737,09 kN. Com a inclusão dos desviadores na Posição 1 (Prot-Hex1-Desv1), houve um aumento expressivo no deslocamento máximo para 80,83 mm (+43,8%), enquanto a carga máxima aumentou para 781,20 kN (+6,0%). Esse comportamento

indica que, embora a resistência global tenha melhorado, houve perda de rigidez estrutural, possivelmente devido a uma redistribuição não ideal das forças.

Na Posição 2 (Prot-Hex1-Desv2), o deslocamento foi reduzido para 57,64 mm (+2,5%), e a capacidade de carga aumentou para 758,52 kN (+2,9%), sugerindo uma melhora no equilíbrio entre rigidez e resistência estrutural. Esse posicionamento apresentou um desempenho mais eficiente do que a configuração Desv1, demonstrando que a escolha da posição dos desviadores influencia diretamente a estabilidade da viga.

A Posição 3 (Prot-Hex1-Desv3) apresentou um comportamento semelhante ao da Posição 2, com um deslocamento de 59,84 mm (+6,4%) e capacidade de carga de 758,73 kN (+2,9%). Apesar do leve aumento no deslocamento, os ganhos de resistência indicam que essa configuração também pode ser considerada uma opção eficiente.

Por outro lado, a Posição 4 (Prot-Hex1-Desv4), onde o desviador foi colocado no centro da viga, apresentou desempenho praticamente idêntico ao da viga sem desviadores, com deslocamento de 56,20 mm (-0,1%) e carga máxima de 737,32 kN (0,0%). Isso sugere que a colocação dos desviadores no centro não trouxe benefícios significativos, reforçando que o posicionamento adequado dos desviadores é essencial para otimizar o comportamento da viga.

Os resultados mostram que a adição de desviadores intermediários em ViMAPs com alvéolos hexagonais impacta diretamente a rigidez e a capacidade de carga da viga, dependendo de sua posição. A Posição 1 (Desv1), embora tenha aumentado a capacidade de carga em 6,0%, resultou em grande aumento no deslocamento (+43,8%), comprometendo a rigidez. As Posições 2 e 3 apresentaram um melhor equilíbrio entre rigidez e resistência, com ganhos moderados na capacidade de carga e deslocamentos controlados. Já a Posição 4 (Desv4) não trouxe alterações significativas, indicando que a inclusão de desviadores no centro da viga não é eficaz para melhorar o desempenho estrutural.

A Tabela 6.65 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos hexagonais, considerando a inserção de desviadores extras em diferentes posições.

As tensões Von Mises (Figura 6.80) mostraram um ligeiro aumento na Posição 1 (Prot-Hex1-Desv1), atingindo 476,2 MPa (+3%), sugerindo maior concentração de esforços na região dos

alvéolos mais externos. Na Posição 3 (Prot-Hex1-Desv3), houve um aumento menor (466,6 MPa, +1%), já nas Posições 2 e 4, os valores de tensão Von Mises se mantiveram próximos aos da viga sem desviadores, o que sugere que nessas configurações os desviadores não alteraram significativamente a distribuição dos esforços.

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.81) permaneceram praticamente inalteradas em todas as configurações, variando em torno de 472 MPa, o que indica que a inclusão dos desviadores não afeta significativamente os esforços normais ao longo da viga. Esse comportamento é semelhante ao observado nas ViMAPs com alvéolos circulares, reforçando que os desviadores atuam mais na estabilidade e redistribuição de cargas internas do que na resistência longitudinal da viga.

As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.82) apresentaram pequenas variações, com a Posição 1 (Prot-Hex1-Desv1) registrando o maior aumento, atingindo 272,1 MPa (+3%), sugerindo que os desviadores próximos às extremidades podem intensificar as tensões cisalhantes na região dos alvéolos, mas essa tensão máxima ocorre em regiões diferentes na viga. A Posição 3 (Prot-Hex1-Desv3) também apresentou um leve aumento para 266,8 MPa (+1%), enquanto as demais configurações mantiveram valores muito próximos ao da viga sem desviadores.

Os resultados indicam que a inserção dos desviadores intermediários tem um impacto mais perceptível nas tensões Von Mises e cisalhantes do que nas tensões longitudinais. A Posição 1 apresentou os maiores aumentos de tensão Von Mises (+3%) e cisalhante (+3%), indicando uma maior concentração de esforços estruturais. A Posição 3 apresentou variações menores, mas ainda assim uma leve intensificação das tensões. Já as Posições 2 e 4 tiveram pouca influência na distribuição de tensões, sugerindo que os desviadores, quando posicionados no centro da viga, não alteram significativamente o comportamento da estrutura.

Tabela 6.65 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
18	Prot-Hex1	460,5	-	472,3	-	263,6	-
53	Prot-Hex1-Desv1	476,2	+3%	472,9	0%	272,1	+3%
54	Prot-Hex1-Desv2	458,7	0%	471,8	0%	262,9	0%
55	Prot-Hex1-Desv3	466,6	+1%	473,1	0%	266,8	+1%
56	Prot-Hex1-Desv4	459	0%	471,7	0%	263,9	0%

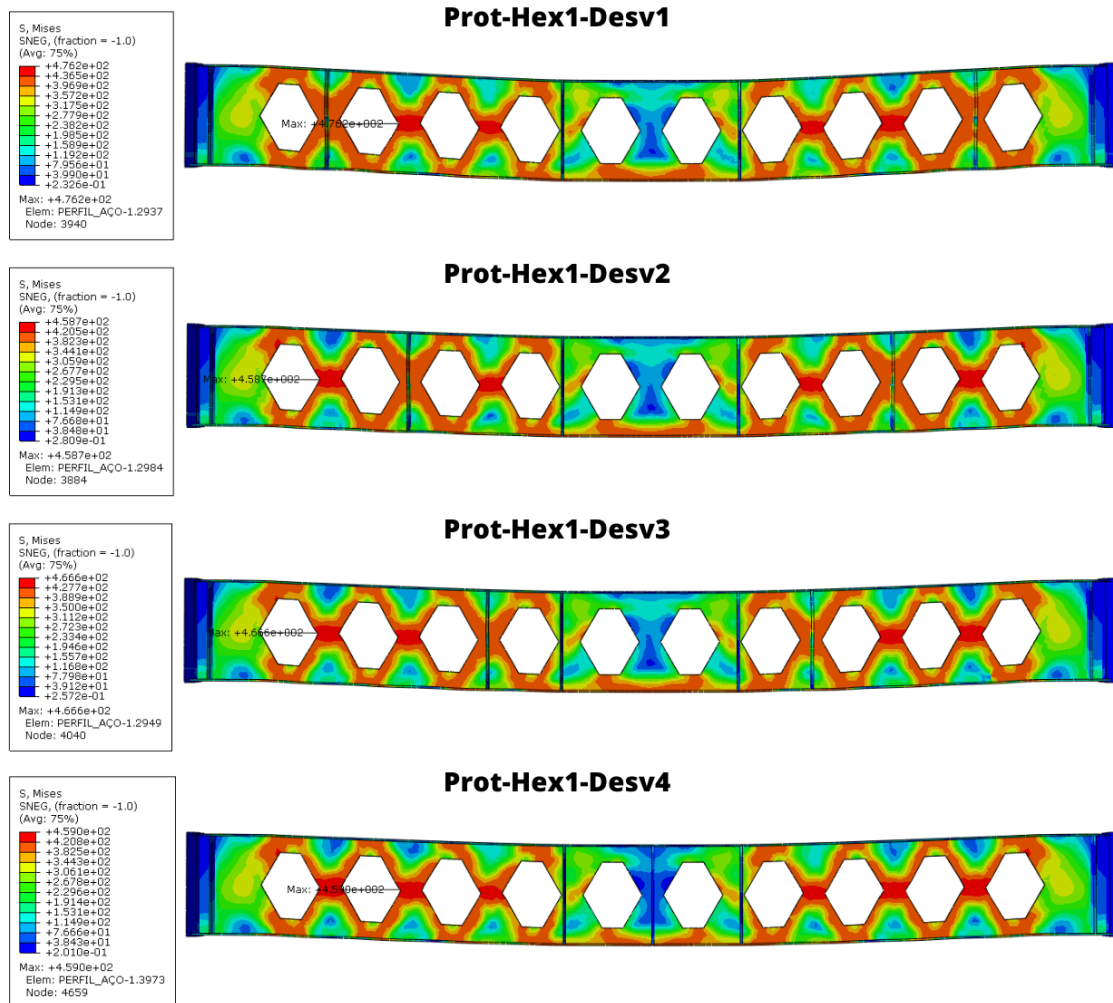


Figura 6.80 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

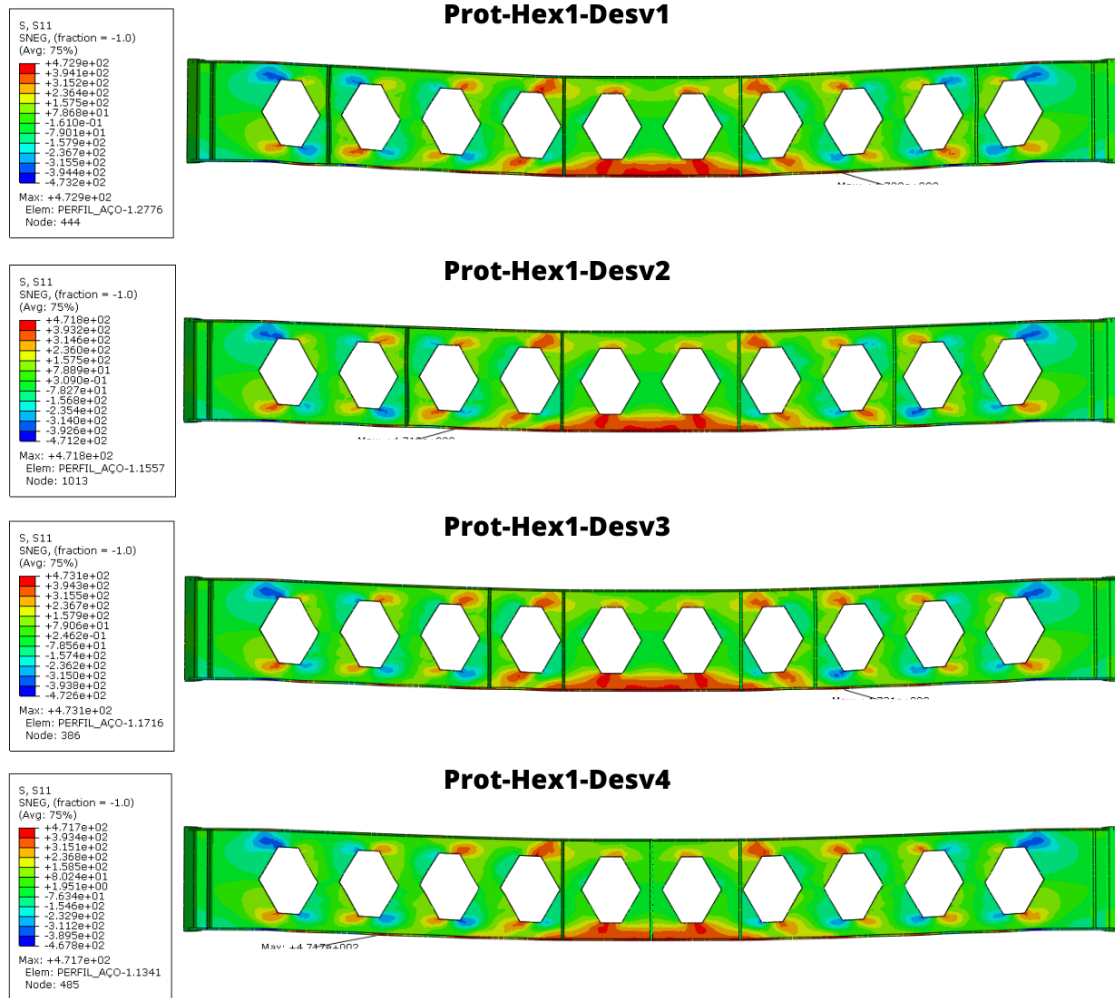


Figura 6.81 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

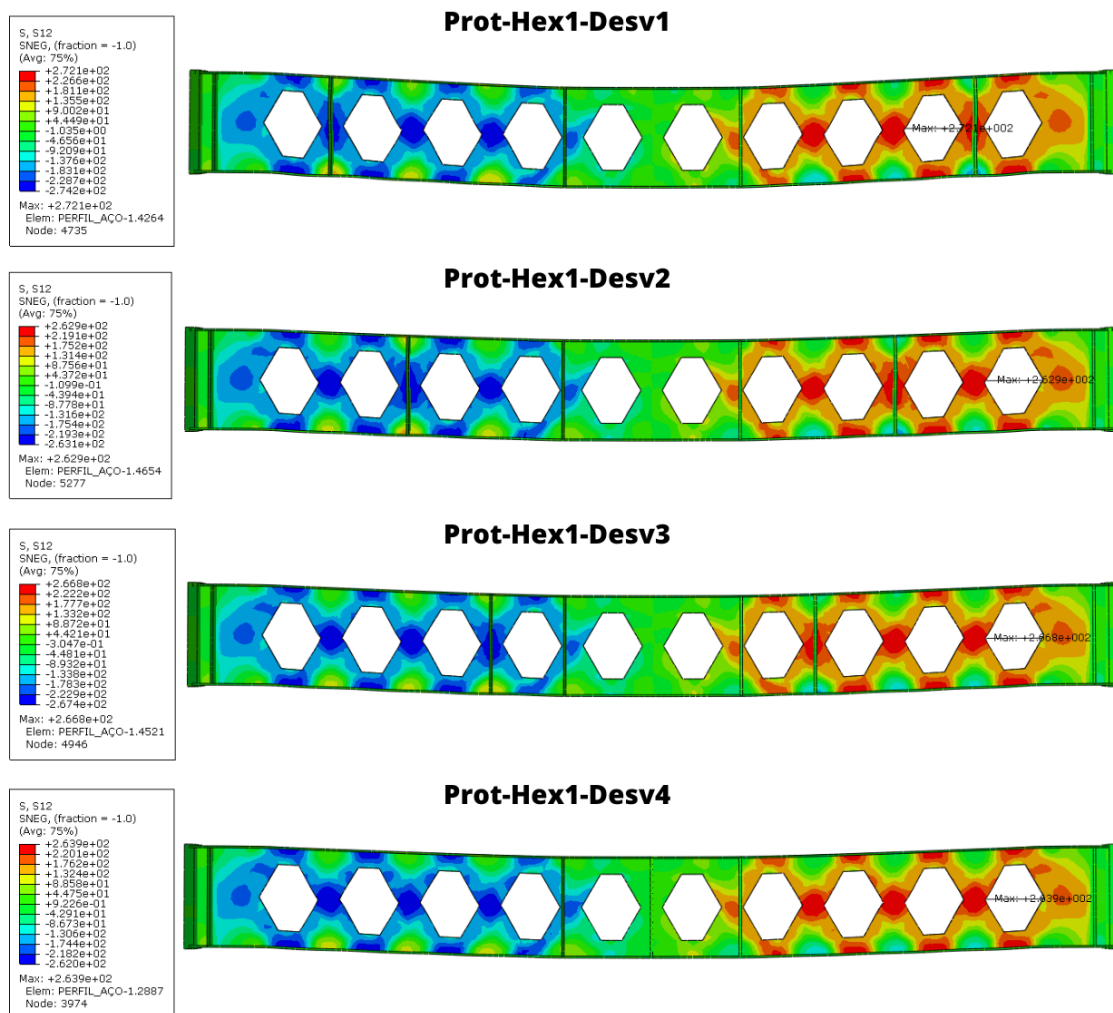


Figura 6.82 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais e par de desviadores extras com posições variadas.

## 6.8 PAR DE DESVIADORES COM ALTERAÇÕES NA ViMAP

Nesta etapa do estudo, busca-se avaliar o impacto de modificações estruturais nos alvéolos externos das ViMAPs, combinadas com a presença de desviadores intermediários. A proposta desta análise é investigar estratégias para otimizar a redistribuição dos esforços estruturais, melhorar a rigidez da viga e minimizar deslocamentos excessivos, mantendo ou até aumentando a capacidade de carga da estrutura.

Foram modeladas ViMAPs com alvéolos circulares e hexagonais, aplicando diferentes intervenções estruturais, conforme indicado na Tabela 6.66. As configurações analisadas incluem: remoção dos dois alvéolos externos, redução do tamanho dos dois alvéolos externos,

fechamento dos alvéolos externos com barras em formato de X e aplicação de protensão apenas na parte intermediária da viga. As propriedades geométricas dos perfis estão especificadas nas Figura 6.83 e Figura 6.84.

Cada uma dessas modificações busca atender a uma necessidade específica da estrutura, seja melhorar a redistribuição de tensões, reduzir efeitos indesejáveis da protensão ou aumentar a rigidez na região dos apoios. A análise comparativa dessas configurações permitirá identificar quais intervenções apresentam os melhores resultados em termos de desempenho estrutural, eficiência mecânica e viabilidade para aplicação prática em projetos de engenharia.

Tabela 6.66 - Indicação das vigas modeladas com um par extra de desviadores e alterações na viga.

<b>Alteração</b>	<b>Círculo 1</b>	<b>Hexágono 1</b>
<b>Remoção de 2 alvéolos externos</b>	Prot-Circ1-Desv1-2alv	Prot-Hex1-Desv1-2alv
<b>2 alvéolos externos menores</b>	Prot-Circ1-Desv1-Menor	Prot-Hex1-Desv1-Menor
<b>2 alvéolos externos fechados com barras em X</b>	Prot-Circ1-Desv1-X	Prot-Hex1-Desv1-X
<b>Cabo de protensão apenas na parte intermediária da viga</b>	Prot-Circ1-Desv1-Cabo	Prot-Hex1-Desv1-Cabo



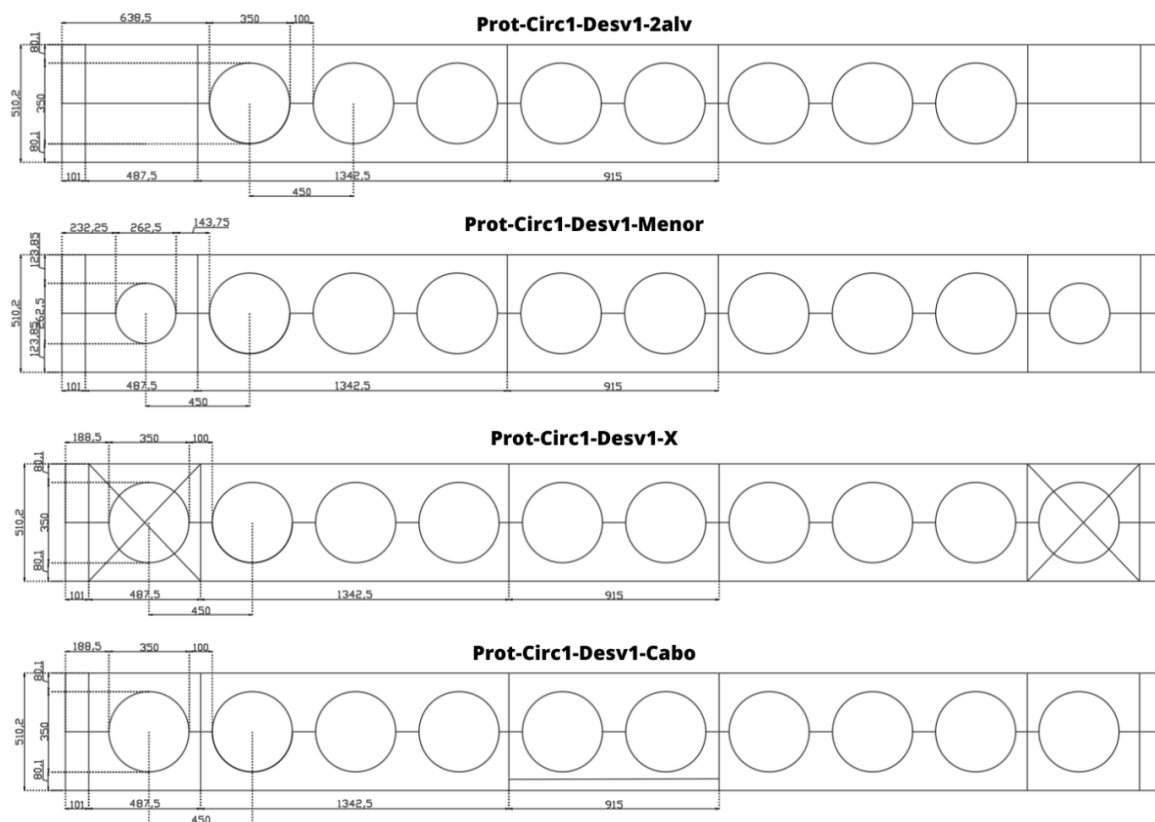


Figura 6.83 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares, um par extra de desviadores e alterações na viga.

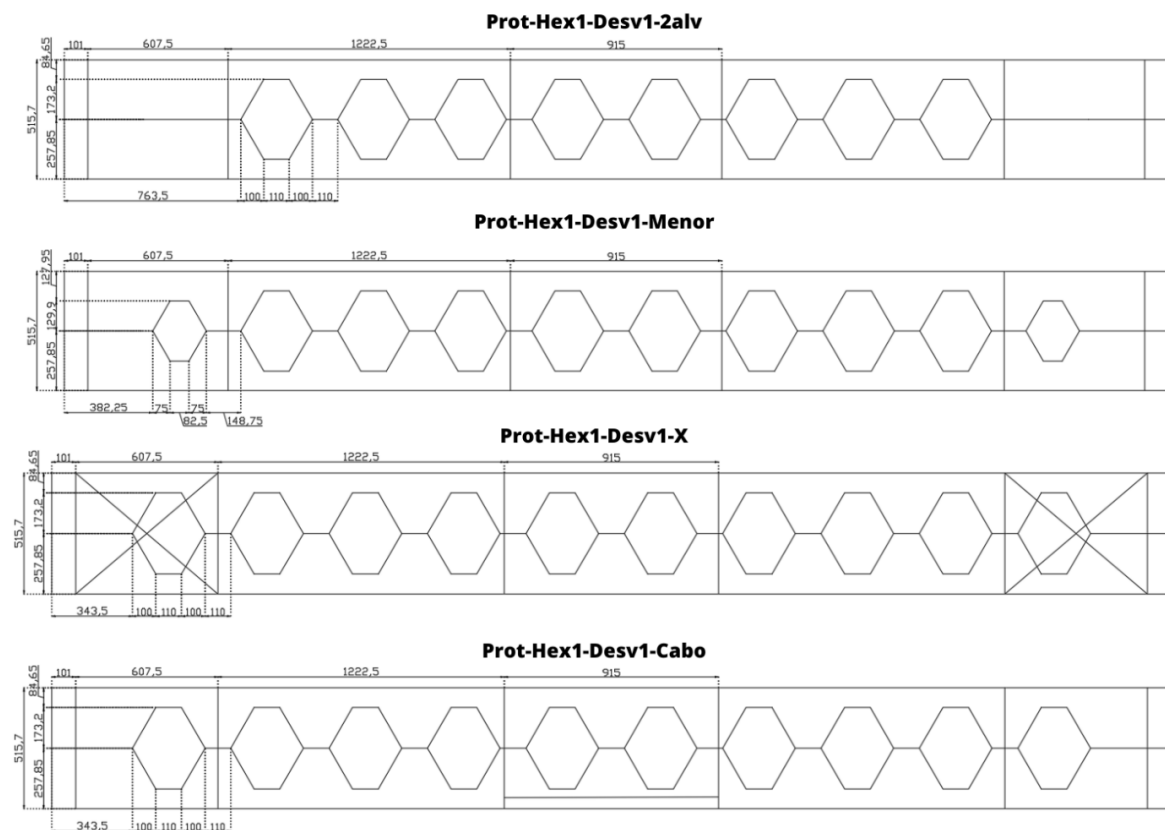


Figura 6.84 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais, um par extra de desviadores e alterações na viga.

### 6.8.1 Alvéolos Circulares

Analisando as vigas com alvéolos circulares, a Figura 6.85 ilustra a curva carga vs. Deslocamento e a Tabela 6.69 apresenta a comparação do deslocamento máximo (U2) e da carga máxima aplicada para ViMAPs com alvéolos circulares e diferentes modificações estruturais. Os dados indicam que as intervenções realizadas tiveram impactos significativos na rigidez e na resistência da viga, com variações expressivas tanto no deslocamento quanto na capacidade de carga.

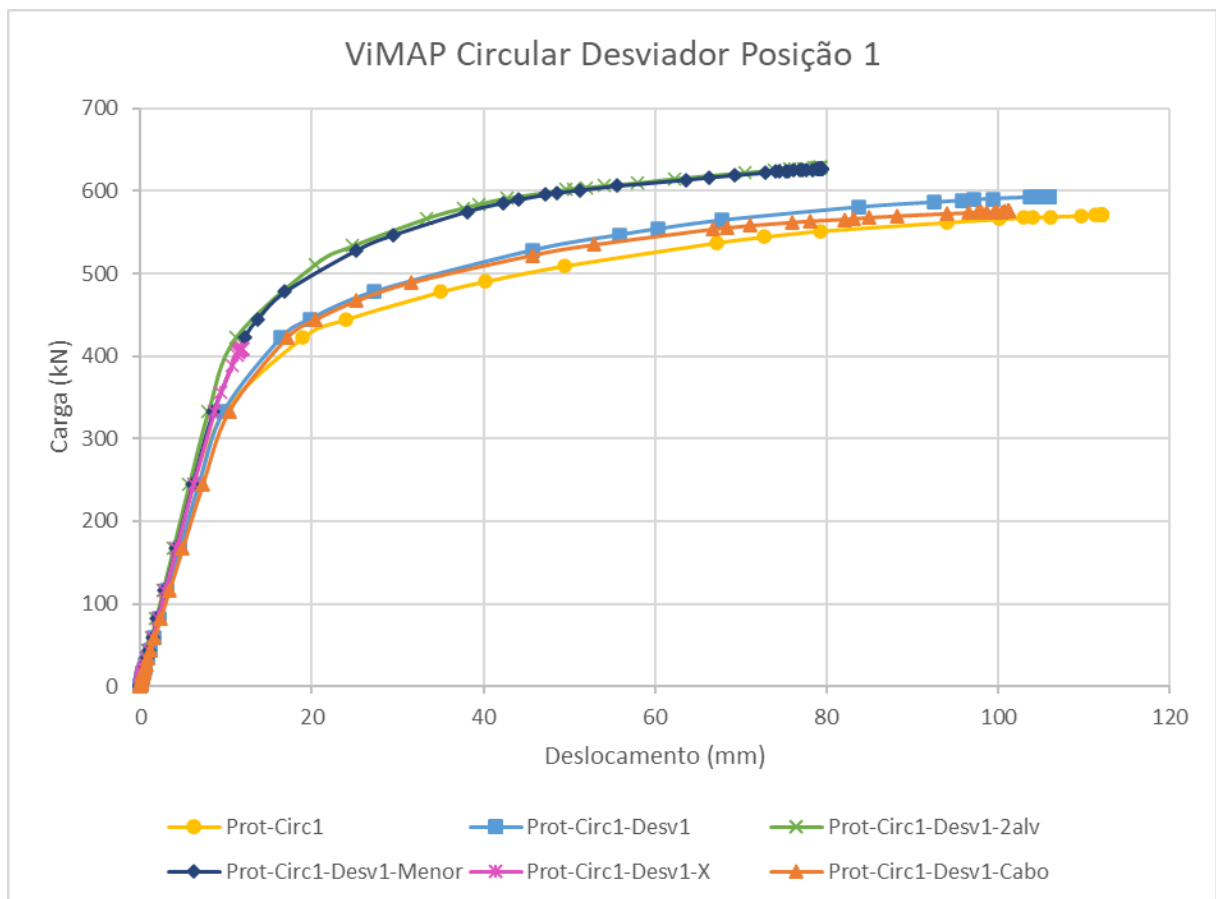


Figura 6.85 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

Tabela 6.67 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
15	Prot-Circ1	112,04	-	570,77	-
49	Prot-Circ1-Desv1	105,93	-5,5%	593,34	+4,0%
57	Prot-Circ1-Desv1-2alv	79,26	-29,3%	628,24	+10,1%
58	Prot-Circ1-Desv1-Menor	79,42	-29,1%	626,45	+9,8%
59	Prot-Circ1-Desv1-X	11,92	-89,4%	408,73	-28,4%
60	Prot-Circ1-Desv1-Cabo	101,26	-9,6%	575,29	0,8%

A viga Prot-Circ1, sem modificações adicionais, apresentou um deslocamento máximo de 112,04 mm e uma carga máxima de 570,77 kN. Com a inclusão do par extra de desviadores na configuração Prot-Circ1-Desv1, houve uma redução de 5,5% no deslocamento e um aumento de 4,0% na carga máxima, indicando um leve ganho de rigidez estrutural e eficiência mecânica.

A remoção dos dois alvéolos externos (Prot-Circ1-Desv1-2alv) resultou em uma redução expressiva de 29,3% no deslocamento, além de um aumento de 10,1% na carga máxima suportada. Esses resultados indicam que a eliminação das aberturas externas melhora a rigidez global da viga, reduzindo os deslocamentos e aumentando sua resistência. Um comportamento semelhante foi observado na viga Prot-Circ1-Desv1-Menor, na qual os alvéolos externos foram reduzidos em tamanho, resultando em uma redução de 29,1% no deslocamento e um aumento de 9,8% na capacidade de carga. Esses valores mostram que diminuir o tamanho dos alvéolos é quase tão eficiente quanto removê-los completamente, sendo uma alternativa válida para o aumento da rigidez.

Por outro lado, a configuração Prot-Circ1-Desv1-X, na qual os alvéolos externos foram fechados com barras em formato de X, houve um colapso prematuro da estrutura, resultando em uma redução de 28,4% na carga máxima suportada, sugerindo que essa configuração compromete a capacidade da viga de distribuir os esforços de forma eficiente.

A configuração Prot-Circ1-Desv1-Cabo, onde a protensão foi aplicada apenas na parte intermediária da viga, apresentou redução de 9,6% no deslocamento máximo e um pequeno aumento de 0,8% na carga máxima suportada. Esses resultados indicam que, embora a protensão intermediária melhore levemente a rigidez da estrutura, seu efeito é inferior ao das modificações nos alvéolos, como a remoção ou redução do tamanho das aberturas externas.

Os resultados indicam que a remoção ou redução dos alvéolos externos são estratégias eficientes para aumentar a rigidez e a capacidade de carga das ViMAPs, sem comprometer significativamente seu desempenho estrutural. Já a protensão localizada na parte intermediária melhora moderadamente o desempenho estrutural, mas não apresenta os mesmos ganhos que as modificações nos alvéolos externos.

A Tabela 6.68 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos circulares, considerando diferentes modificações nos alvéolos externos e a presença de um par extra de desviadores.

As tensões Von Mises (Figura 6.86 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga. Figura 6.86) apresentaram uma leve redução na maioria das configurações, com a remoção dos alvéolos externos (-2,1%) e a redução do tamanho dos alvéolos (-2,5%) promovendo pequenas melhorias na distribuição das tensões. No entanto, a configuração

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.87) permaneceram praticamente inalteradas nas configurações com desviadores e remoção/redução dos alvéolos externos, com variações inferiores a -2,2%. As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.88) também apresentaram uma leve redução na maioria das configurações, com os melhores resultados para a redução dos alvéolos externos (-2,9%) e a protensão intermediária (-2,8%).

As modificações nos alvéolos externos impactam diretamente a distribuição das tensões nas ViMAPs. A remoção ou redução dos alvéolos promove pequenas melhorias na rigidez sem comprometer significativamente a resistência. O fechamento dos alvéolos com barras em X proporciona a maior redução das tensões, mas ocorreu devida a ruptura prematura da peça.

Tabela 6.68 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
15	Prot-Circ1	478,6	-	472,1	-	263,2	-
49	Prot-Circ1-Desv1	472,0	-1,4%	472,7	+0,1%	258,7	-1,7%
57	Prot-Circ1-Desv1-2alv	468,5	-2,1%	463,5	-1,8%	258,4	-1,8%
58	Prot-Circ1-Desv1-Menor	466,6	-2,5%	461,8	-2,2%	255,6	-2,9%
59	Prot-Circ1-Desv1-X	411,6	-14,0%	368,2	-22,0%	221,6	-15,8%
60	Prot-Circ1-Desv1-Cabo	463,0	-3,3%	472,6	+0,1%	255,7	-2,8%

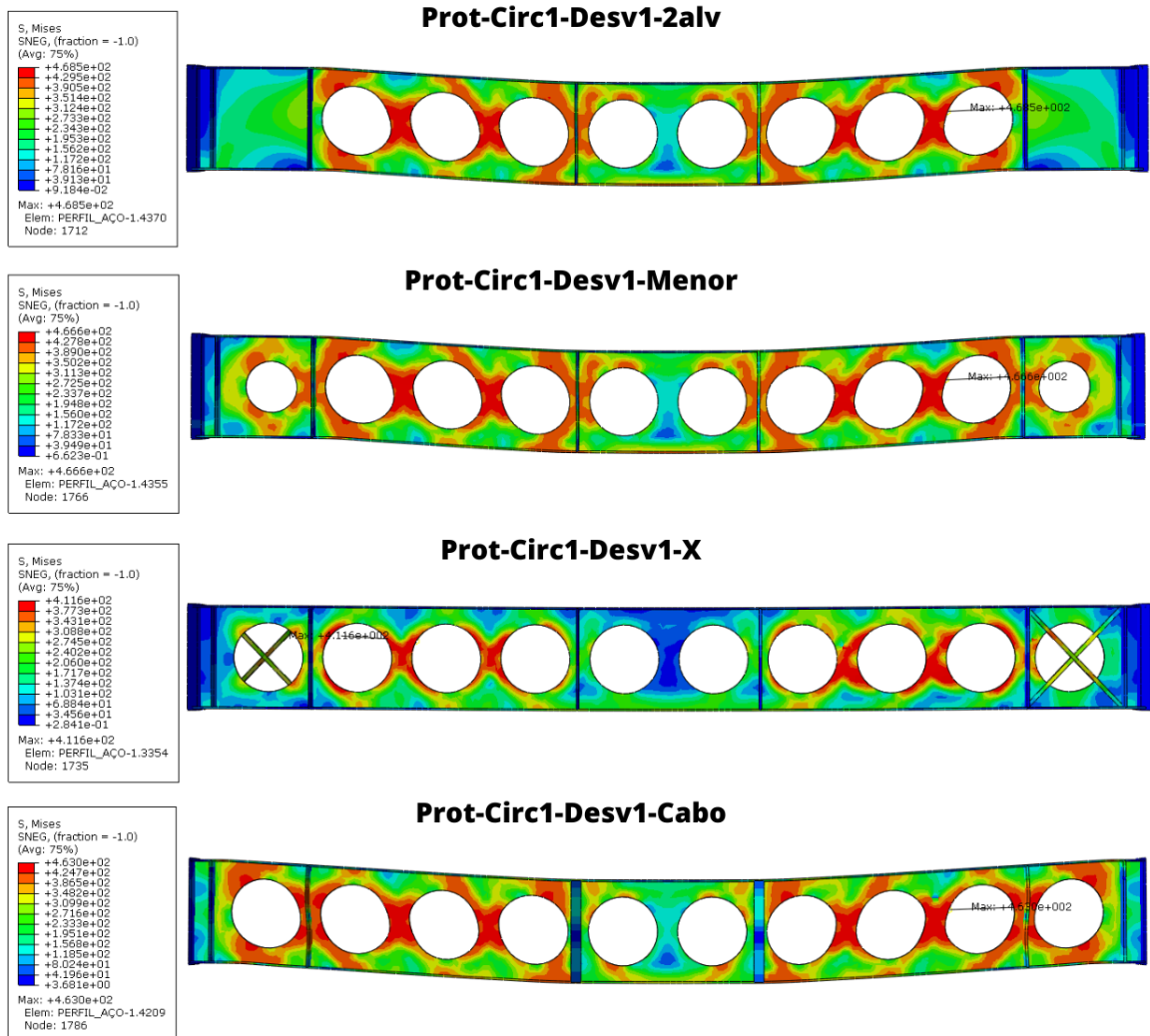


Figura 6.86 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

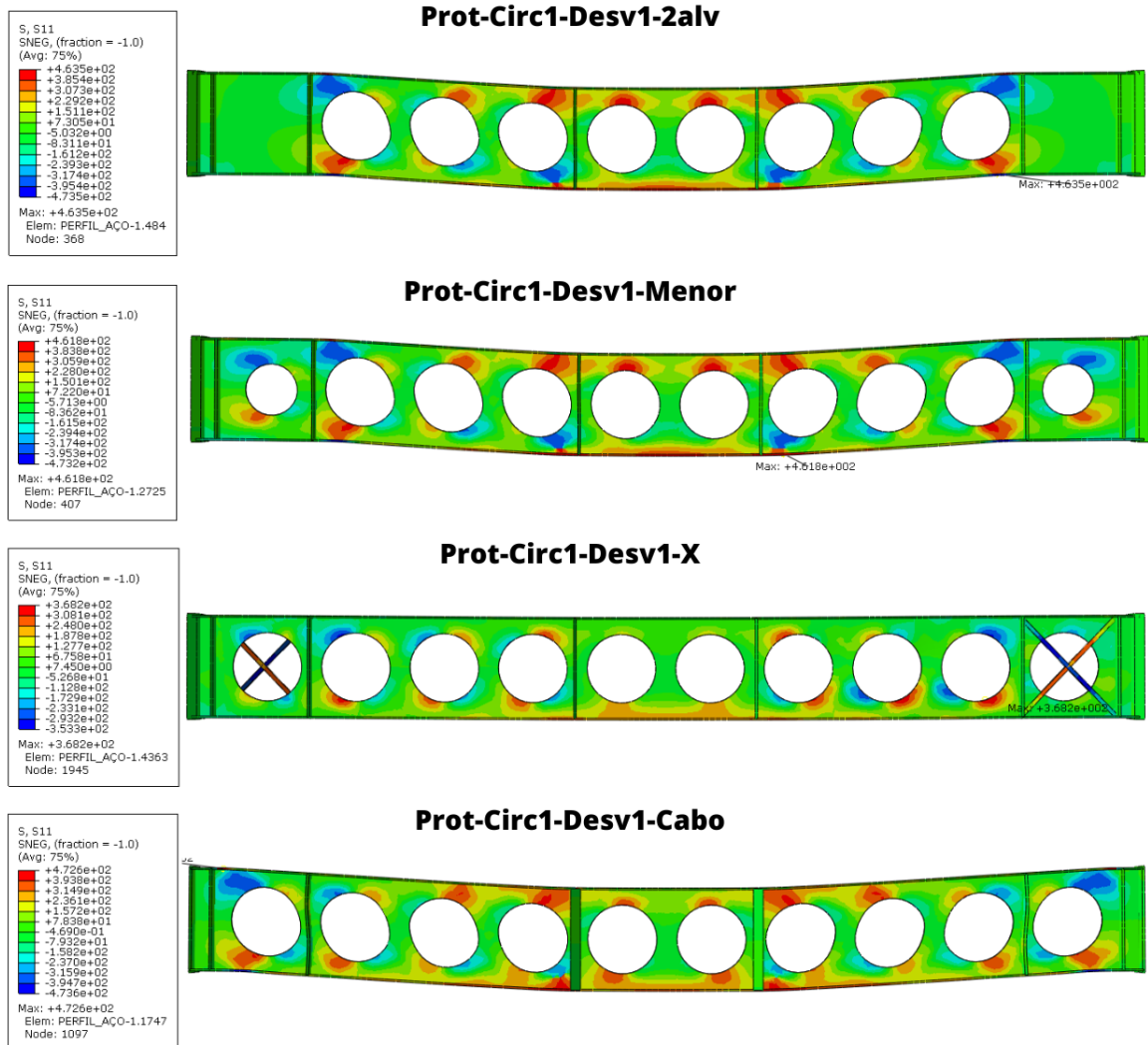


Figura 6.87 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

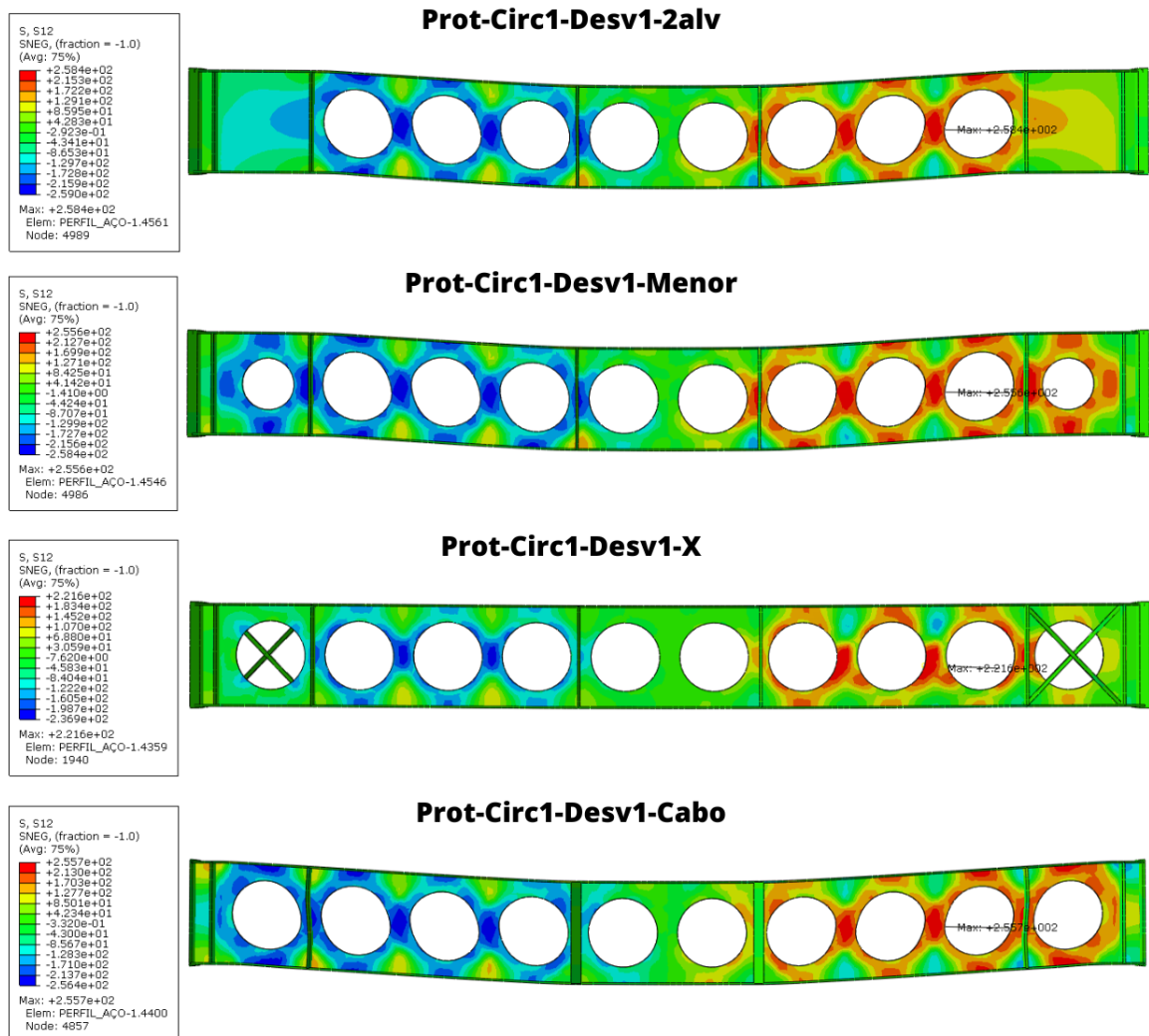


Figura 6.88 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com um par extra de desviadores e alterações na viga.

## 6.8.2 Alvéolos Hexagonais

Para vigas com alvéolos hexagonais, a Figura 6.89 ilustra a curva e a Tabela 6.69 apresenta a comparação do deslocamento máximo (U2) e da carga máxima aplicada em ViMAPs, analisando o impacto da inserção de um par extra de desviadores e diferentes modificações nos alvéolos externos.



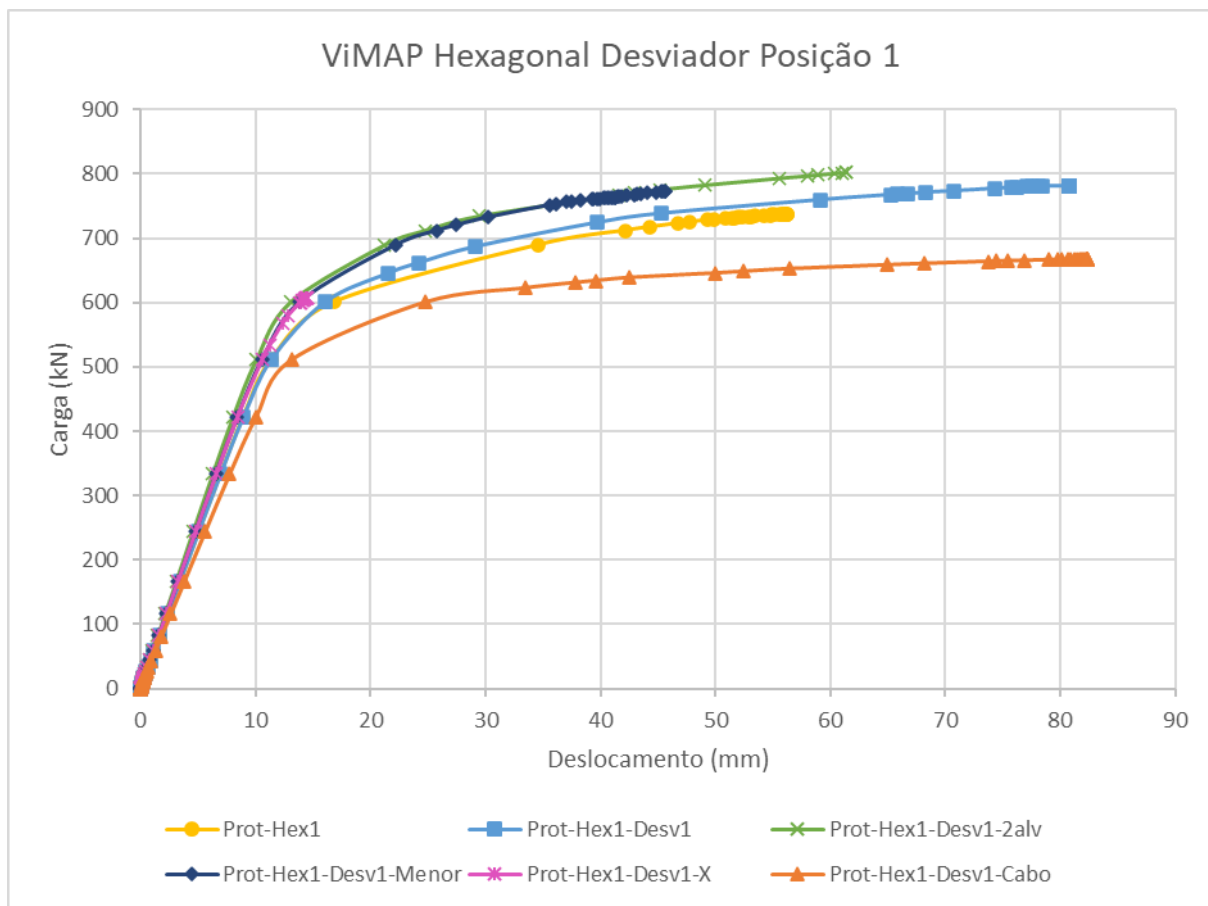


Figura 6.89 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

Tabela 6.69 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
18	Prot-Hex1	56,23	-	737,09	-
53	Prot-Hex1-Desv1	80,83	+43,8%	781,20	+6,0%
61	Prot-Hex1-Desv1-2alv	61,37	+9,1%	801,82	+8,8%
62	Prot-Hex1-Desv1-Menor	45,66	-18,8%	773,16	+4,9%
63	Prot-Hex1-Desv1-X	14,46	-74,3%	607,42	-17,6%
64	Prot-Hex1-Desv1-Cabo	82,38	+46,5%	667,84	-9,4%

A configuração Prot-Hex1-Desv1, com apenas a adição dos desviadores, resultou em um aumento expressivo do deslocamento (+43,8%), indicando redução na rigidez da viga. Entretanto, a capacidade de carga apresentou um aumento de 6%, sugerindo que a redistribuição de esforços favoreceu a resistência global da estrutura.

A remoção dos dois alvéolos externos (Prot-Hex1-Desv1-2alv) melhorou a rigidez estrutural, reduzindo o deslocamento para 61,37 mm (+9,1%) e aumentando a carga máxima em 8,8%, indicando que a eliminação dessas aberturas favorece a redistribuição dos esforços e melhora o desempenho estrutural da viga.

A redução do tamanho dos alvéolos externos (Prot-Hex1-Desv1-Menor) apresentou um efeito ainda mais significativo na rigidez da viga, reduzindo o deslocamento em 18,8% e mantendo um aumento de 4,9% na capacidade de carga. Esse comportamento sugere que diminuir o tamanho dos alvéolos externos pode ser uma alternativa eficiente para melhorar a rigidez da viga sem comprometer sua resistência.

A configuração com fechamento dos alvéolos em barras em X (Prot-Hex1-Desv1-X) apresentou um colapso prematuro, reduzindo o deslocamento em 74,3%. No entanto, essa configuração também reduziu a capacidade de carga em 17,6%, demonstrando que a comprometeu a eficiência estrutural da viga.

Por fim, a protensão aplicada apenas na parte intermediária da viga (Prot-Hex1-Desv1-Cabo) resultou em um aumento de deslocamento (+46,5%) e uma redução de 9,4% na carga máxima suportada. Esse resultado indica que a protensão intermediária não foi suficiente para compensar os efeitos da redistribuição dos esforços, tornando essa configuração menos eficiente.

Os resultados indicam que a remoção ou redução dos alvéolos externos são estratégias eficientes para melhorar a rigidez e aumentar a capacidade de carga das ViMAPs com alvéolos hexagonais. O fechamento dos alvéolos com barras em X comprometeu significativamente a resistência da viga. Já a protensão localizada na parte intermediária não se mostrou eficaz, pois resultou em um aumento expressivo do deslocamento sem benefícios na capacidade de carga. Assim, a eliminação parcial ou a redução dos alvéolos externos se destaca como a estratégia mais equilibrada para otimizar o desempenho estrutural das ViMAPs.

A Tabela 6.70 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos hexagonais, considerando a inclusão de um par extra de desviadores e diferentes modificações nos alvéolos externos. Os resultados indicam variações importantes na distribuição das tensões, com algumas configurações melhorando a eficiência estrutural, enquanto outras comprometem o desempenho da viga.

As tensões Von Mises (Figura 6.90) mostraram um comportamento variado dependendo da modificação adotada. A configuração Prot-Hex1-Desv1, com apenas os desviadores, resultou em um aumento de 3% nas tensões Von Mises, sugerindo uma maior concentração de esforços na estrutura. A remoção dos alvéolos externos (Prot-Hex1-Desv1-2alv) apresentou uma redução parcial dos esforços (-1%), enquanto a redução do tamanho dos alvéolos externos (Prot-Hex1-Desv1-Menor) foi a mais eficiente, reduzindo as tensões em 2%, favorecendo uma melhor redistribuição dos esforços. A configuração Prot-Hex1-Desv1-Cabo, que aplicou protensão apenas na parte intermediária da viga, aumentou as tensões Von Mises em 4%, evidenciando que essa modificação intensificou a concentração de esforços na alma da viga.

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.91) permaneceram praticamente inalteradas na maioria das configurações, com exceção da Prot-Hex1-Desv1-X, que rompeu prematuramente e apresentou uma redução de 7%. Já a configuração Prot-Hex1-Desv1-Cabo foi a única a apresentar um aumento de 4% nas tensões longitudinais, o que indica que a protensão aplicada apenas na região intermediária contribuiu para aumentar os esforços normais na viga.

As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.92) acompanharam a tendência das tensões Von Mises. A Prot-Hex1-Desv1 apresentou um aumento de 3%, enquanto a remoção dos alvéolos externos (+1%) teve um impacto mais sutil. A redução do tamanho dos alvéolos (-2%) ajudou na redistribuição das tensões cisalhantes, enquanto a configuração Prot-Hex1-Desv1-Cabo apresentou redução de 7% na tensão cisalhante, demonstrando que a protensão intermediária teve um efeito mais significativo no controle dos esforços cisalhantes.

Os resultados indicam que a redução do tamanho dos alvéolos externos foi a modificação mais eficiente para diminuir as tensões estruturais sem comprometer a capacidade de carga. O fechamento dos alvéolos com barras em X, apesar de aliviar significativamente as tensões, mostrou-se menos vantajoso devido à sua influência negativa na resistência global da viga, já que a estrutura não teve o desempenho adequado colapsando antes do previsto. Já a protensão

apenas na parte intermediária teve um efeito misto, aumentando as tensões longitudinais e Von Mises, mas reduzindo as tensões cisalhantes, sugerindo que essa estratégia pode beneficiar certas aplicações, mas não é a mais eficiente em termos de redistribuição de esforços. Assim, a escolha da modificação ideal deve considerar o equilíbrio entre rigidez, tensões e capacidade de carga, garantindo um desempenho otimizado da ViMAP.

Tabela 6.70 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
18	Prot-Hex1	460,5	-	472,3	-	263,6	-
53	Prot-Hex1-Desv1	476,2	+3%	472,9	0%	272,1	+3%
61	Prot-Hex1-Desv1-2alv	467,1	+1%	472,2	0%	266,8	+1%
62	Prot-Hex1-Desv1-Menor	451,0	-2%	472,1	0%	259,1	-2%
63	Prot-Hex1-Desv1-X	411,6	-11%	440,4	-7%	237,2	-10%
64	Prot-Hex1-Desv1-Cabo	477,5	+4%	493,5	+4%	245,7	-7%

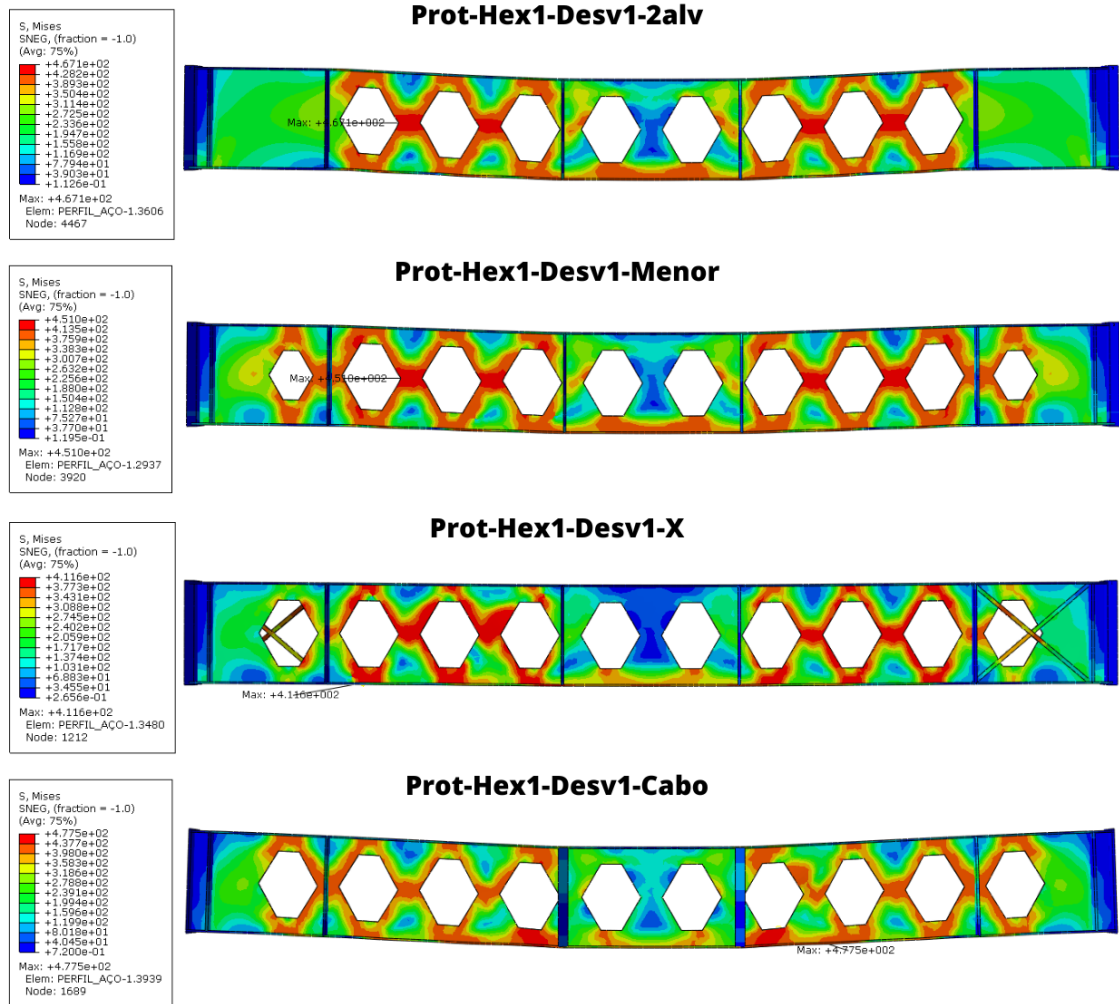


Figura 6.90 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

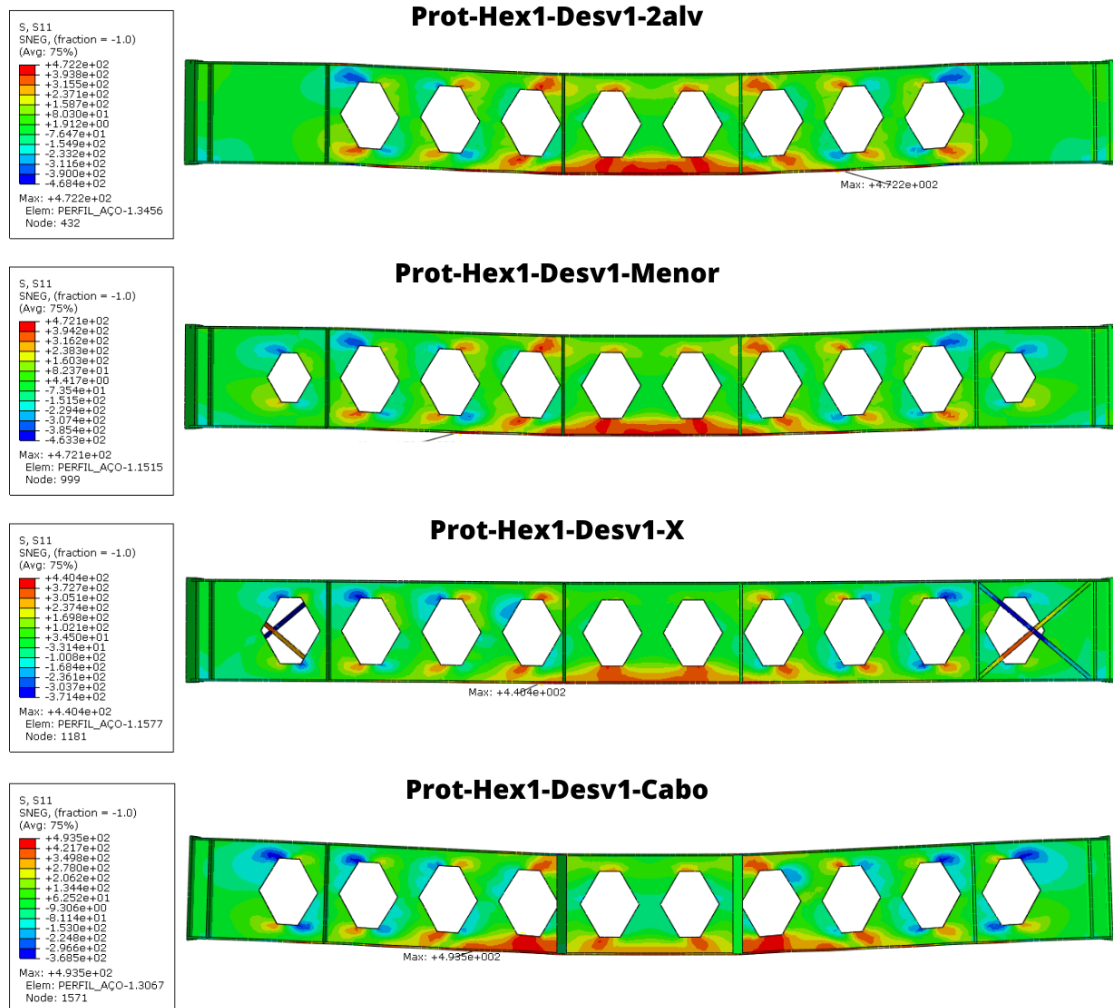


Figura 6.91 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

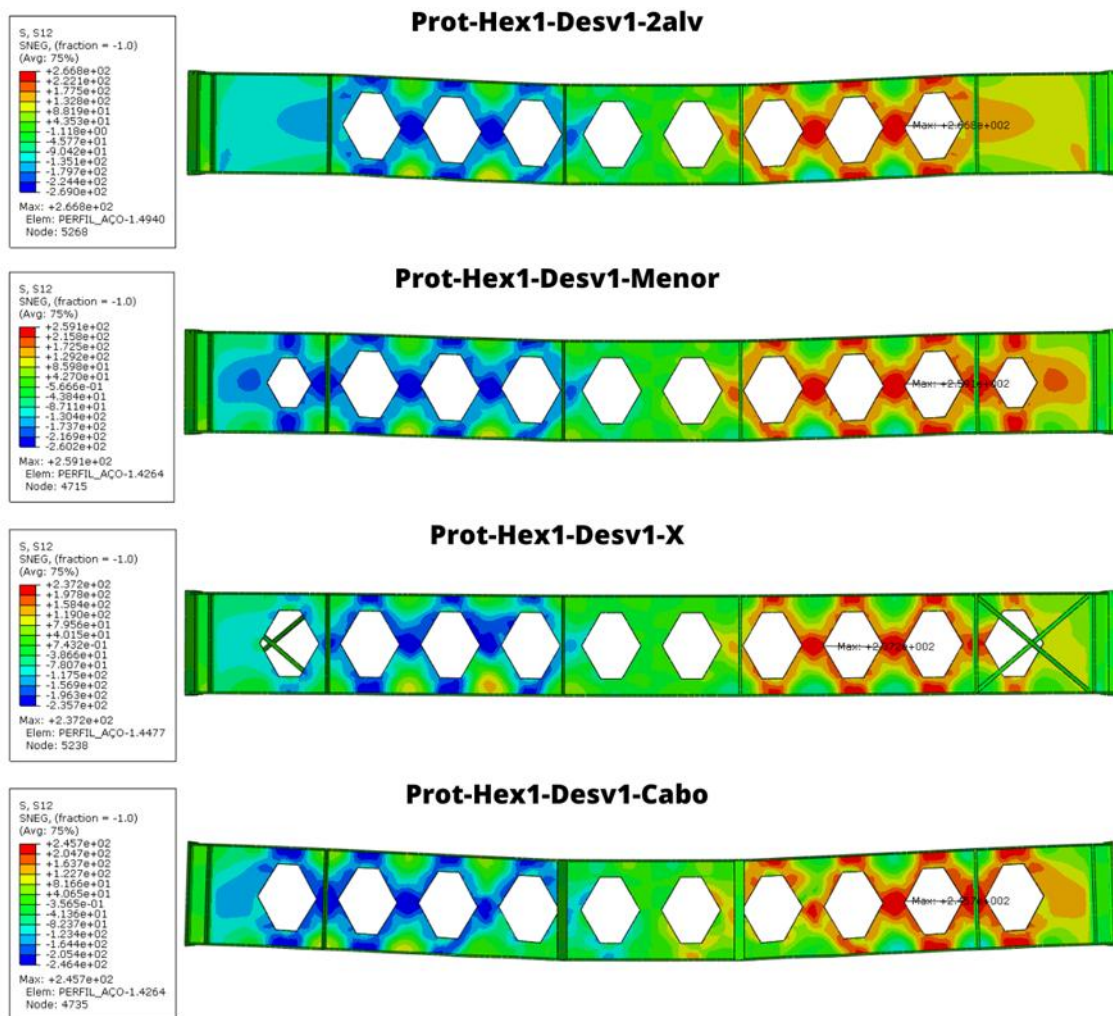


Figura 6.92 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com um par extra de desviadores e alterações na viga.

## 6.9 MÚLTIPLOS DESVIADORES COM ALTERAÇÕES NA ViMAP

Nesta etapa do estudo, investiga-se a influência da adição de múltiplos desviadores intermediários na rigidez e na capacidade de carga das ViMAPs com alvéolos circulares e hexagonais. Além disso, algumas configurações incorporam modificações nos alvéolos externos, como fechamento com barras em X e protensão aplicada apenas na região intermediária da viga. O objetivo desta análise é avaliar a distribuição dos esforços estruturais, a estabilidade e o comportamento das tensões em diferentes combinações de desviadores e ajustes geométricos.

A Tabela 6.71 apresenta as variações das configurações analisadas. Inicialmente, foi considerada a adição de um par de desviadores na posição 1 (Desv1), aumentando progressivamente o número de desviadores com sua inclusão nas posições 2 e 3 (Desv12 e Desv123). Em seguida, foram avaliadas combinações em que os alvéolos externos foram fechados com barras em X, além da inserção de protensão intermediária para verificar seu efeito na rigidez e na redistribuição das tensões.

Essa análise permitirá compreender o impacto de múltiplos desviadores na rigidez e resistência das ViMAPs, bem como a influência das modificações nos alvéolos externos e da protensão intermediária no desempenho estrutural das vigas. Comparando os diferentes modelos, será possível identificar as combinações mais eficientes para melhorar o desempenho estrutural e otimizar a aplicação das ViMAPs em projetos de engenharia civil.

Nas Figura 6.93 e Figura 6.94 estão ilustradas as características geométricas dos perfis modelados, com alvéolos circulares e hexagonais, respectivamente.

Tabela 6.71 -Indicação das vigas modeladas com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

<b>Alteração</b>	<b>Círculo 1</b>	<b>Hexágono 1</b>
<b>Par de desviadores na posição 1</b>	Prot-Circ1-Desv1	Prot-Hex1-Desv1
<b>Par de desviadores na posição 1 e 2</b>	Prot-Circ1-Desv12	Prot-Hex1-Desv12
<b>Par de desviadores na posição 1, 2 e 3</b>	Prot-Circ1-Desv123	Prot-Hex1-Desv123
<b>Par de desviadores na posição 1, 2 e 3, com protensão intermediária</b>	Prot-Circ1-Desv123-Cabo	Prot-Hex1-Desv123-Cabo
<b>Par de desviadores na posição 1, 2 e 3, com alvéolos externos fechados com barras em X</b>	Prot-Circ1-Desv123-X	Prot-Hex1-Desv123-X
<b>Par de desviadores na posição 1, 2 e 3, com protensão intermediária e alvéolos externos fechados com barras em X</b>	Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X	Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X



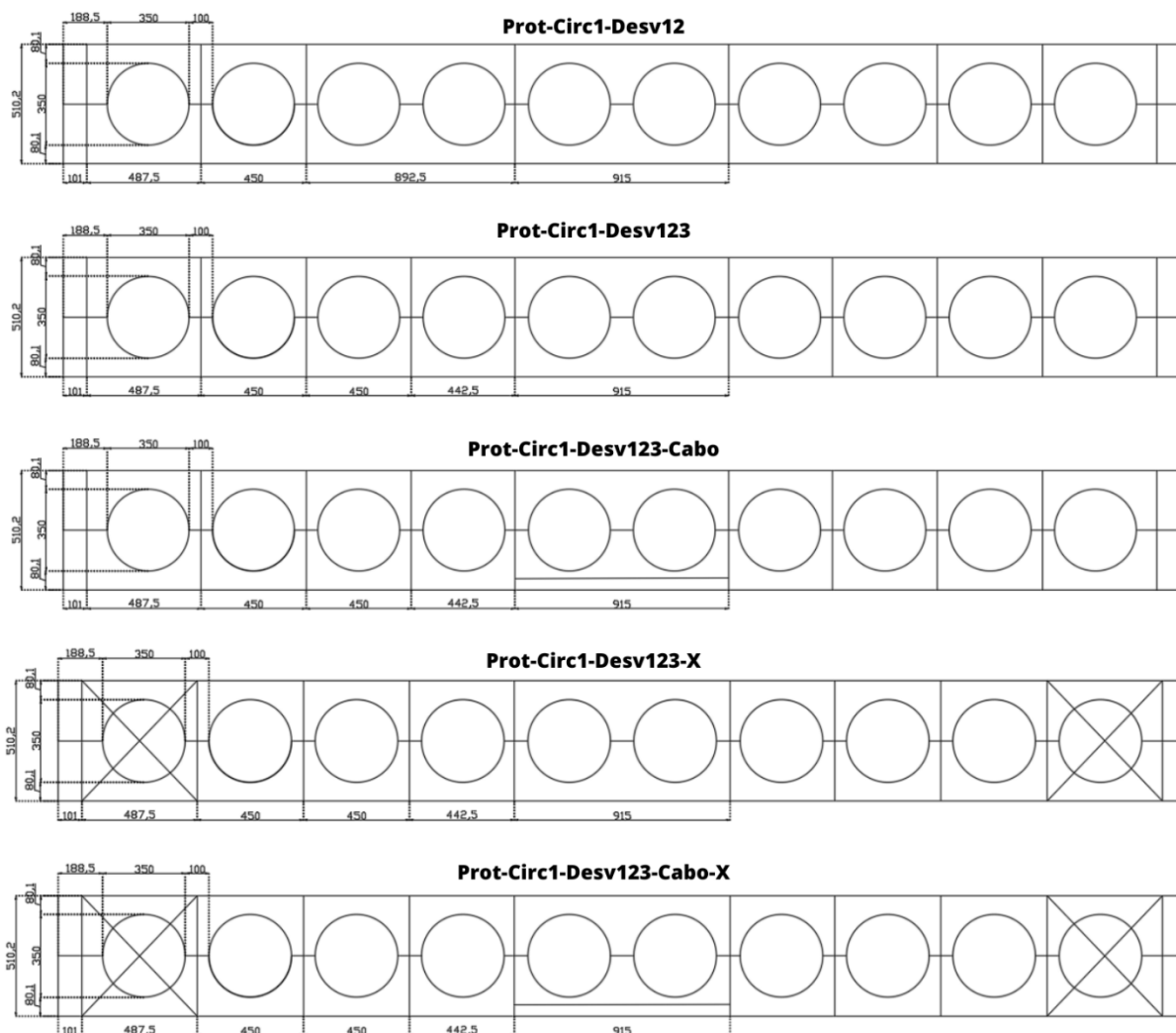


Figura 6.93 - Dimensões das vigas com alvéolos circulares, múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

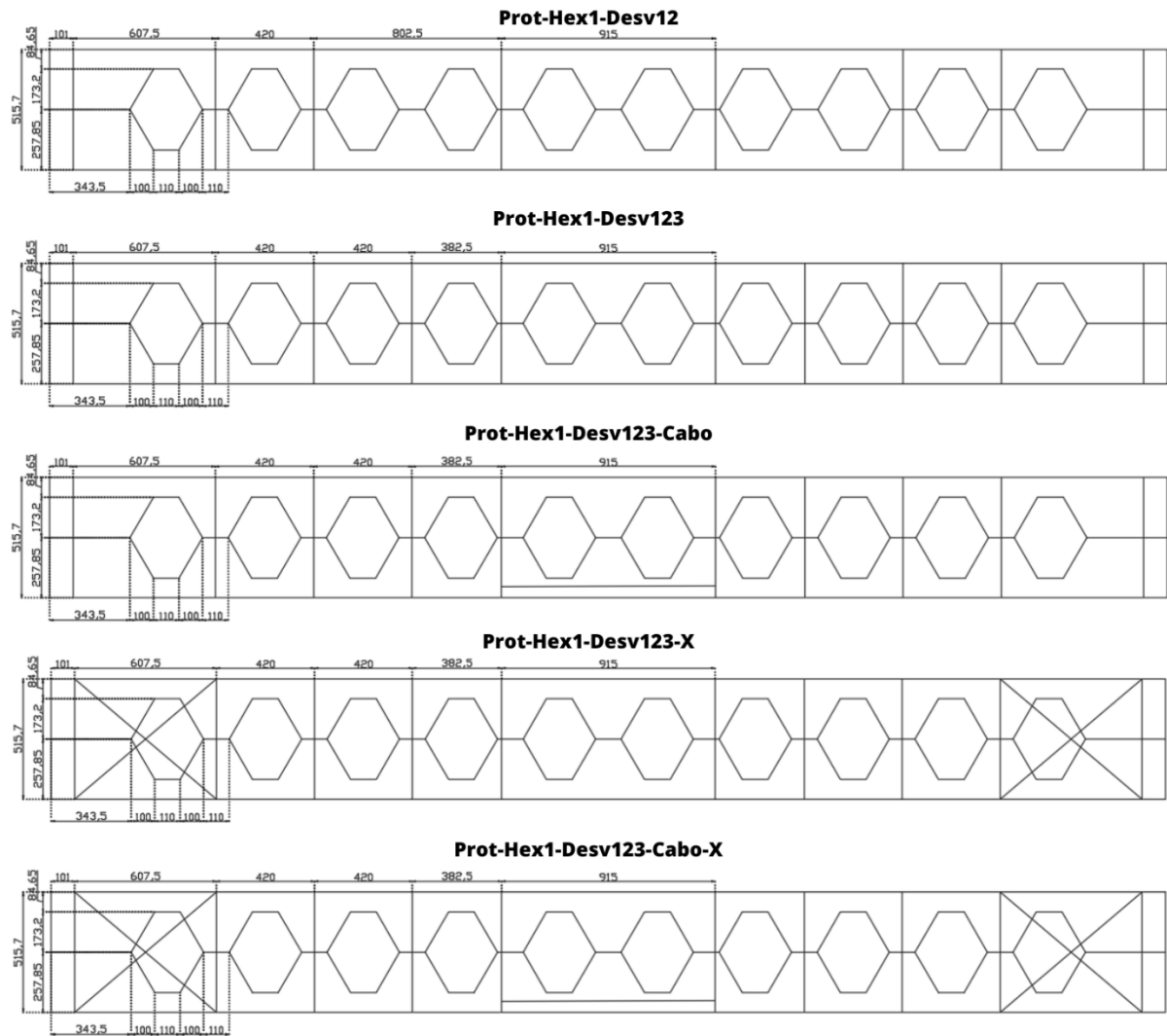


Figura 6.94 - Dimensões das vigas com alvéolos hexagonais, múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

### 6.9.1 Alvéolos Circulares

A Figura 6.95 e a Tabela 6.72 apresentam a comparação do deslocamento máximo ( $U_2$ ) e da carga máxima aplicada em ViMAPs com alvéolos circulares, avaliando o impacto da adição progressiva de múltiplos desviadores intermediários e de modificações nos alvéolos externos. Os resultados indicam melhorias significativas na rigidez da viga conforme mais desviadores são adicionados, além de variações na capacidade de carga dependendo da configuração adotada.

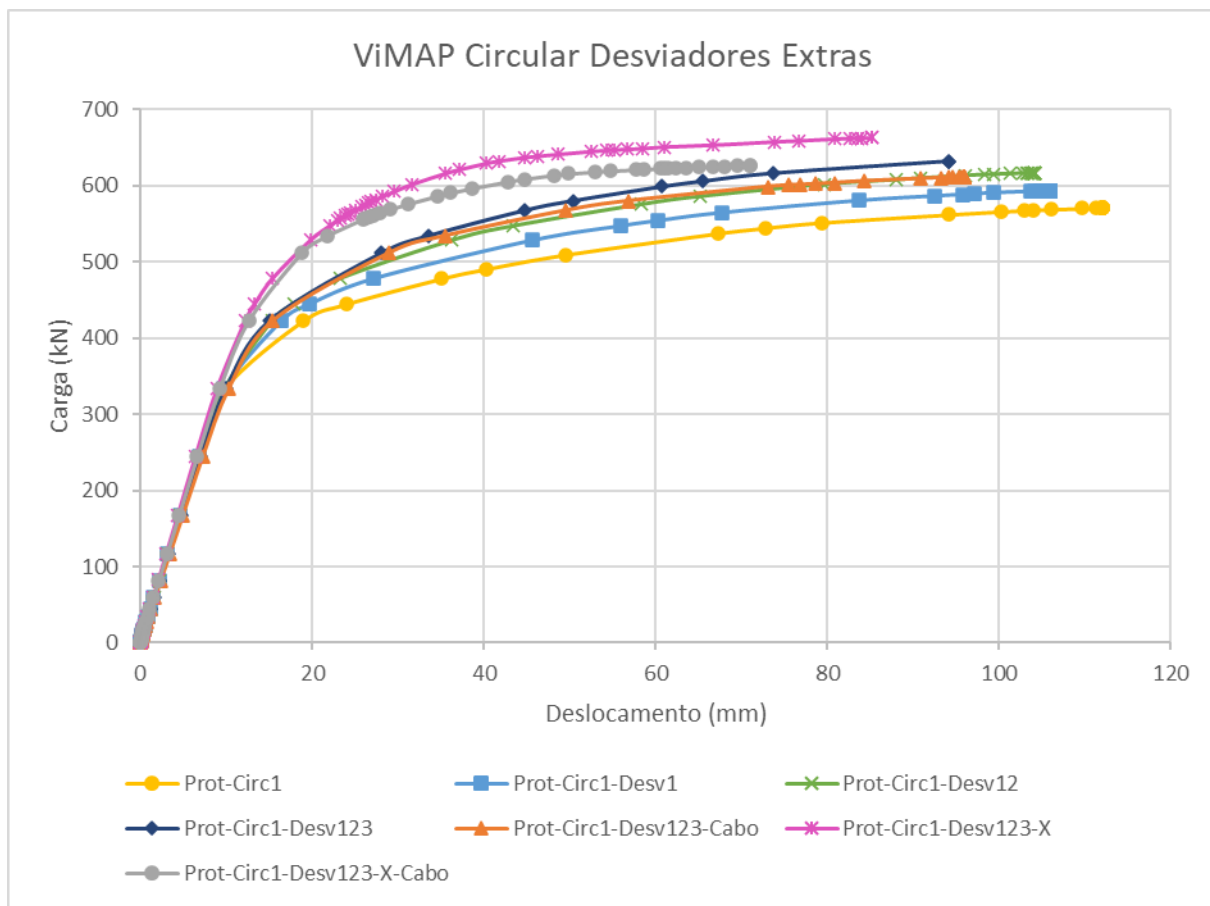


Figura 6.95 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

Tabela 6.72 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
15	Prot-Circ1	112,04	-	570,77	-
49	Prot-Circ1-Desv1	105,93	-5,5%	593,34	+4,0%
65	Prot-Circ1-Desv12	104,21	-7,0%	616,77	+8,1%
66	Prot-Circ1-Desv123	94,16	-16,0%	632,26	+10,8%
67	Prot-Circ1-Desv123-Cabo	95,89	-14,4%	611,41	+7,1%
68	Prot-Circ1-Desv123-X	85,23	-23,9%	662,68	+16,1%
69	Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X	71,03	-36,6%	626,35	+9,7%

A introdução de um par de desviadores na posição 1 (Prot-Circ1-Desv1) reduziu o deslocamento em 5,5%, enquanto a capacidade de carga aumentou 4,0%, demonstrando um efeito inicial positivo na rigidez da viga. Com a adição de desviadores na posição 2 (Prot-Circ1-Desv12), o deslocamento foi reduzido em 7,0%, enquanto a carga máxima aumentou 8,1%, indicando que o ganho estrutural se torna mais expressivo conforme os desviadores são distribuídos ao longo da viga.

Quando os desviadores foram inseridos também na posição 3 (Prot-Circ1-Desv123), os efeitos na rigidez se intensificaram, resultando em uma redução de 16,0% no deslocamento máximo e um aumento de 10,8% na capacidade de carga, sugerindo que a adição progressiva dos desviadores promove uma redistribuição mais eficiente dos esforços estruturais.

A introdução de protensão apenas na parte intermediária da viga (Prot-Circ1-Desv123-Cabo) apresentou um comportamento semelhante ao da viga com desviadores nas três posições, com uma redução de 14,4% no deslocamento e um aumento de 7,1% na carga máxima. Isso indica que a protensão intermediária não substitui completamente a necessidade de múltiplos desviadores, mas pode atuar como um mecanismo complementar para controle de deslocamentos.

O fechamento dos alvéolos externos com barras em X (Prot-Circ1-Desv123-X) foi a configuração que mais aumentou a capacidade de carga, com um acréscimo de 16,1%, além de uma redução de 23,9% no deslocamento, evidenciando um aumento significativo na rigidez estrutural. A combinação dessa configuração com protensão intermediária (Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X) maximizou a eficiência estrutural, reduzindo o deslocamento em 36,6%, enquanto a carga máxima apresentou um aumento expressivo de 9,7%, confirmando que a combinação entre desviadores, fechamento dos alvéolos e protensão intermediária proporciona ganhos significativos na rigidez sem comprometer a resistência global da viga.

A Tabela 6.73 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos circulares, avaliando o impacto da adição progressiva de múltiplos desviadores intermediários, bem como das modificações nos alvéolos externos e na aplicação de protensão intermediária. Os resultados indicam que a adição de desviadores reduz as tensões globais, principalmente nas tensões Von Mises e cisalhantes, enquanto as tensões longitudinais se mantêm praticamente inalteradas.

As tensões Von Mises (Figura 6.96) diminuem progressivamente conforme mais desviadores são adicionados. A viga Prot-Circ1-Desv1 apresentou uma redução modesta de 1%, enquanto a configuração com desviadores em todas as três posições (Prot-Circ1-Desv123) apresentou uma redução mais expressiva de 3%. A introdução da protensão intermediária (Prot-Circ1-Desv123-Cabo) amplificou esse efeito, reduzindo a tensão Von Mises em 5%. O fechamento dos alvéolos externos com barras em X (Prot-Circ1-Desv123-X) não teve grande impacto nessa variável, enquanto a combinação de protensão e fechamento dos alvéolos (Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X) resultou na maior redução das tensões Von Mises (-8%), indicando um alívio significativo na distribuição das tensões ao longo da viga.

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.97) permaneceram praticamente constantes em todas as configurações analisadas, variando dentro de um intervalo de apenas 0,5 MPa, o que sugere que a adição de desviadores e as modificações nos alvéolos externos não impactam diretamente os esforços longitudinais na viga.

As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.98) apresentaram reduções significativas, confirmando o impacto da inserção de desviadores na redistribuição dos esforços internos. A adição progressiva de desviadores reduziu as tensões cisalhantes em até 9% (Prot-Circ1-Desv123), e a introdução da protensão intermediária na mesma configuração levou a uma redução de 10% (Prot-Circ1-Desv123-Cabo). O fechamento dos alvéolos com barras em X (Prot-Circ1-Desv123-X) resultou em um efeito similar, com queda de 9% nas tensões cisalhantes. A configuração mais eficiente na redução da tensão cisalhante foi a Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X, que combinou todos os reforços estruturais e apresentou uma redução de 10%, confirmando que essa estratégia promove um melhor controle das tensões cisalhantes na viga.

Os resultados indicam que a adição progressiva de desviadores reduz as tensões Von Mises e cisalhantes, sem alterar significativamente as tensões longitudinais. A introdução da protensão intermediária e o fechamento dos alvéolos externos com barras em X demonstraram ser estratégias eficientes para aliviar as tensões internas da viga, principalmente nas tensões Von Mises. A configuração Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X, que combina múltiplos desviadores, fechamento dos alvéolos e protensão intermediária, foi a mais eficiente na redução das tensões estruturais, proporcionando maior estabilidade e melhor redistribuição dos esforços na viga.

Tabela 6.73 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
15	Prot-Circ1	478,6	-	472,1	-	263,2	-
49	Prot-Circ1-Desv1	472,0	-1%	472,7	0%	258,7	-2%
65	Prot-Circ1-Desv12	468,2	-2%	472,3	0%	253,8	-4%
66	Prot-Circ1-Desv123	463,2	-3%	472,5	0%	238,4	-9%
67	Prot-Circ1-Desv123-Cabo	455,6	-5%	471,9	0%	237,6	-10%
68	Prot-Circ1-Desv123-X	470,0	-2%	470,4	0%	238,6	-9%
69	Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X	439,4	-8%	470,5	0%	237,3	-10%

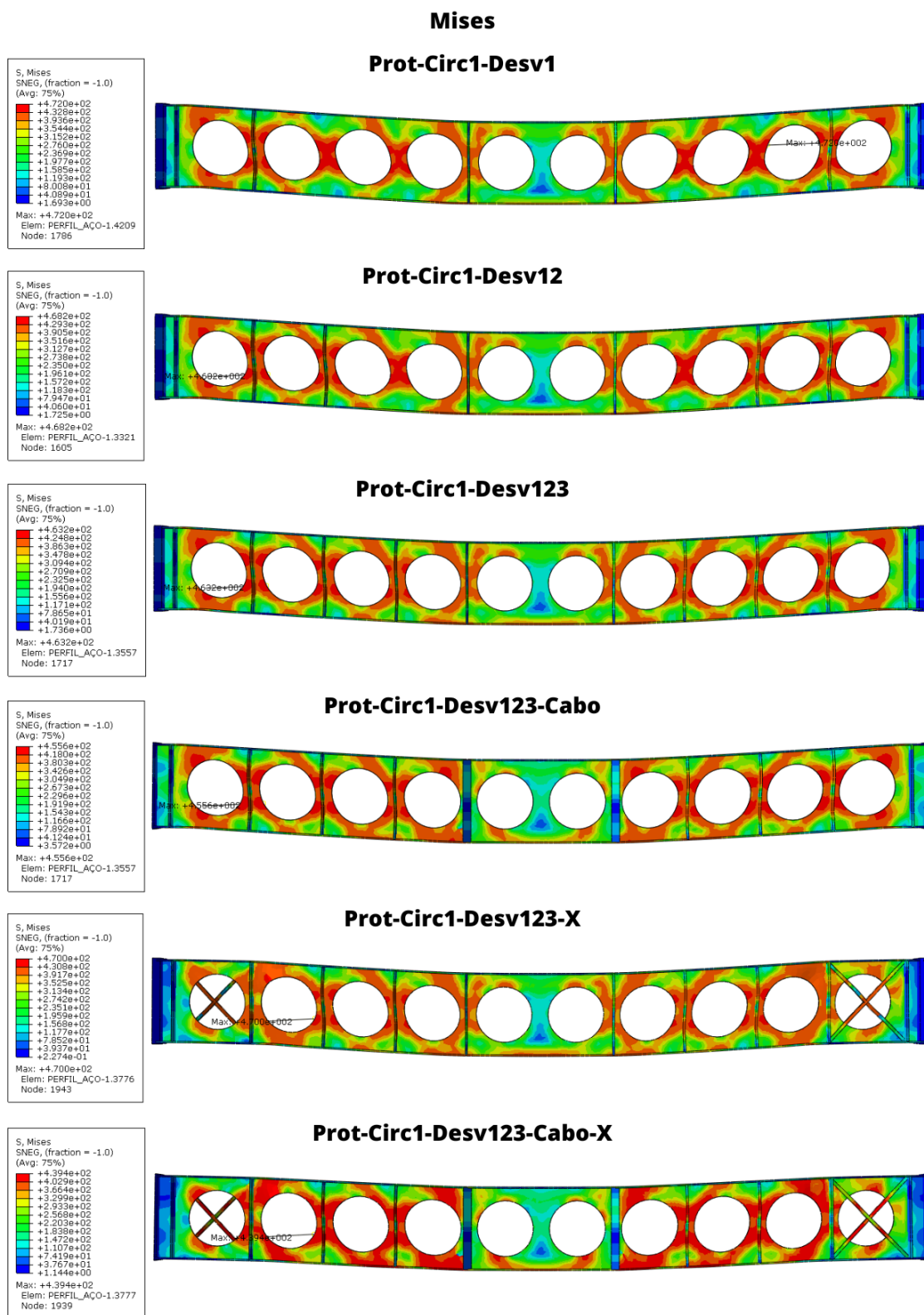


Figura 6.96 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

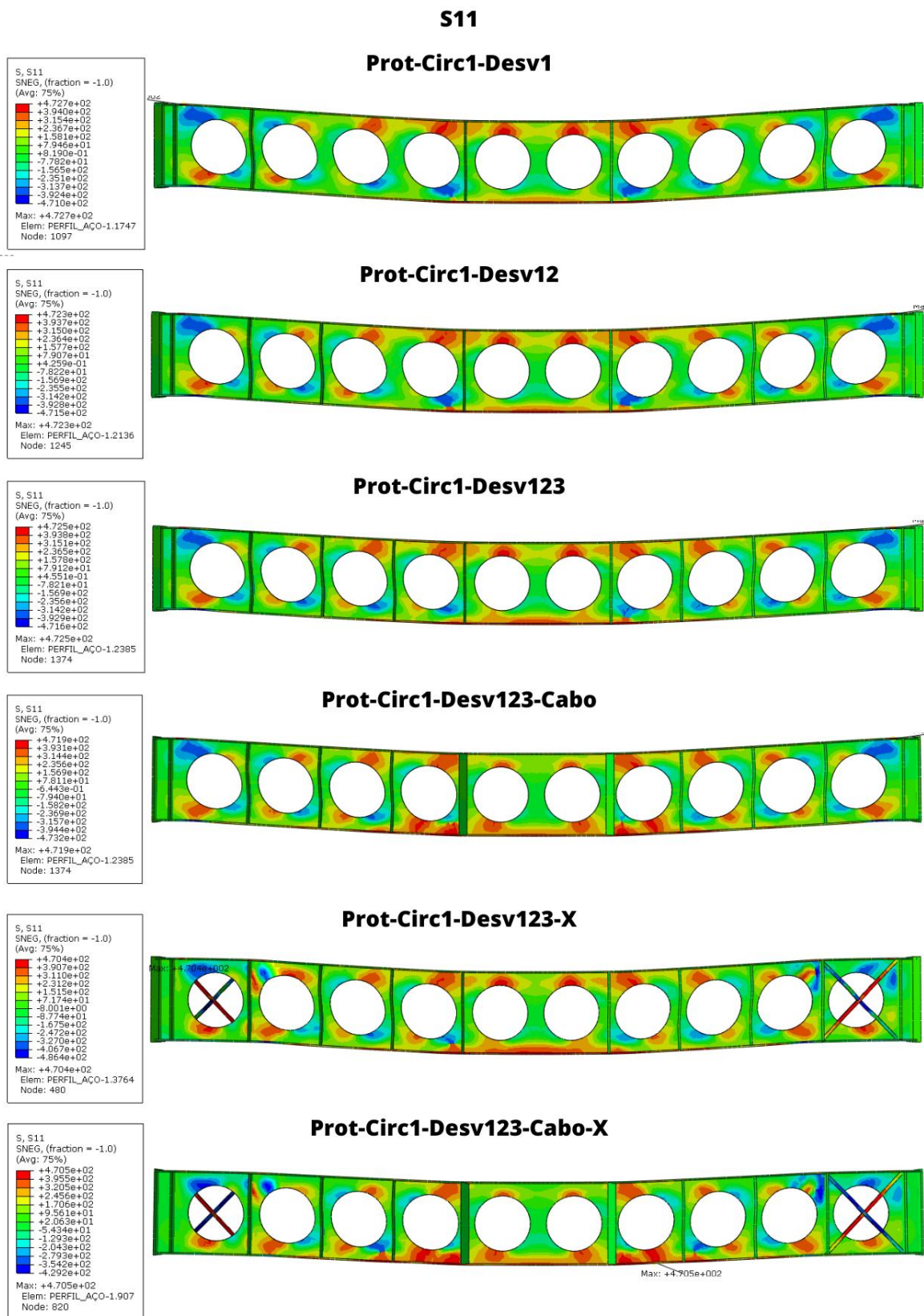


Figura 6.97 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.



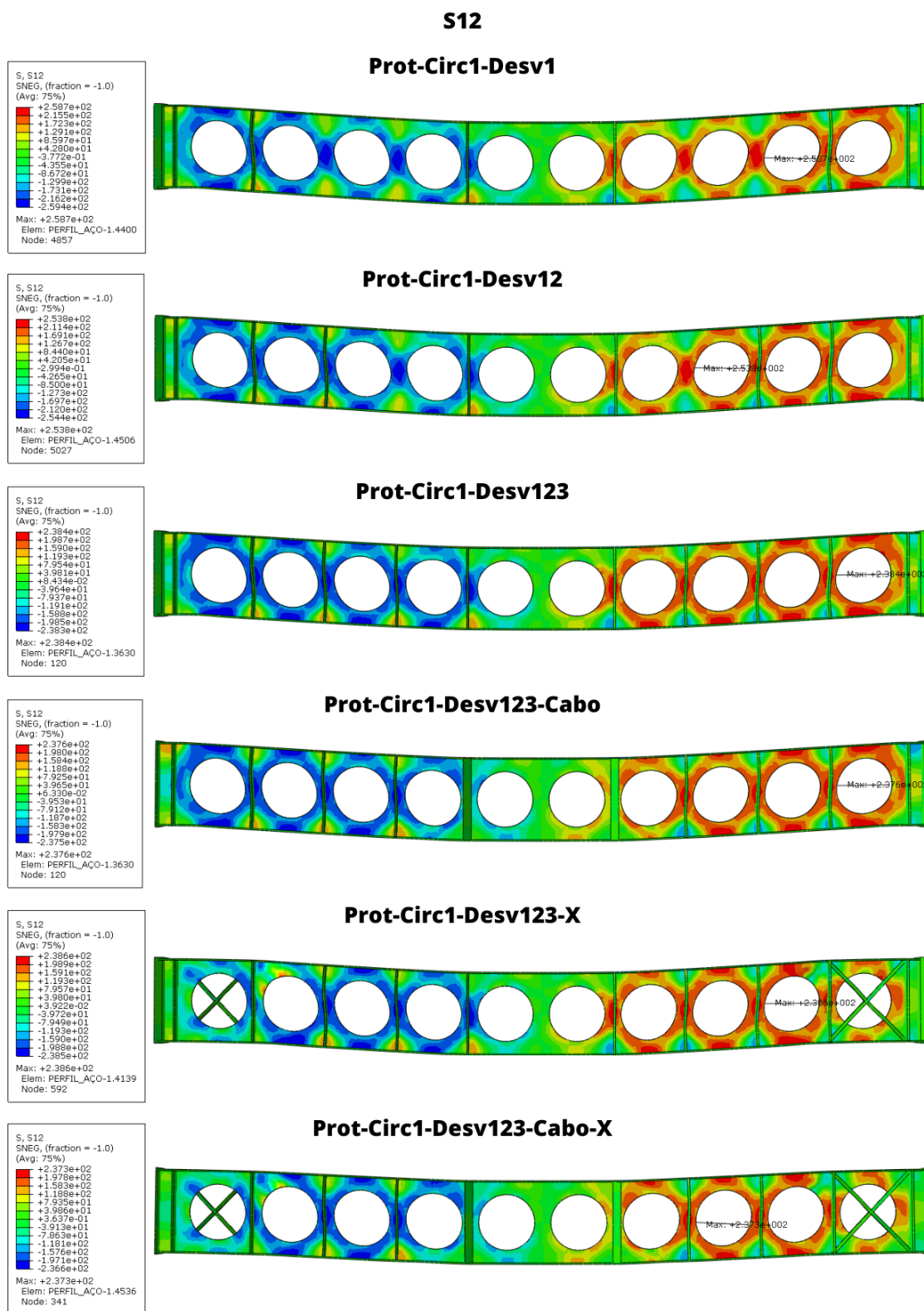


Figura 6.98 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos circulares com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

### 6.9.2 Alvéolos Hexagonais

A Figura 6.99 e a Tabela 6.74 apresenta a comparação do deslocamento máximo ( $U_2$ ) e da carga máxima aplicada em ViMAPs com alvéolos hexagonais, considerando a influência de múltiplos desviadores intermediários e alterações nos alvéolos externos. Os resultados indicam variações expressivas na rigidez e na capacidade de carga, dependendo da configuração adotada.

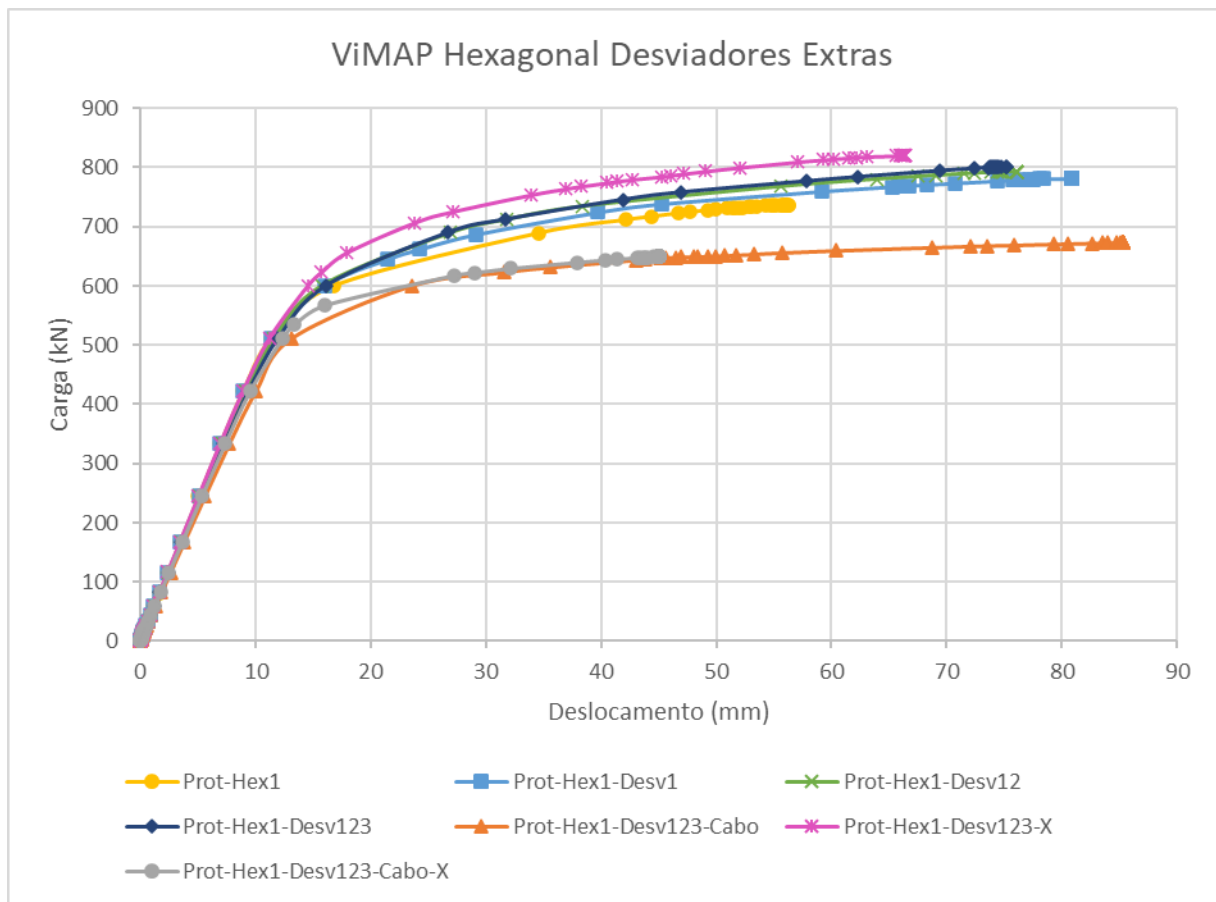


Figura 6.99 - Curva carga x deslocamento em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

Tabela 6.74 - Comparação do deslocamento máximo (U2) [mm] e carga máxima aplicada [kN] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

	Viga	Deslocamento máximo (mm)	%	Carga Máxima (kN)	%
18	Prot-Hex1	56,23	-	737,09	-
53	Prot-Hex1-Desv1	80,83	+43,8%	781,20	+6,0%
70	Prot-Hex1-Desv12	76,08	+35,3%	792,89	+7,6%
71	Prot-Hex1-Desv123	75,15	+33,7%	801,59	+8,8%
72	Prot-Hex1-Desv123-Cabo	85,30	+51,7%	673,11	-8,7%
73	Prot-Hex1-Desv123-X	66,35	+18,0%	820,26	+11,3%
74	Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X	45,09	-19,8%	649,09	-11,9%

A introdução de um par de desviadores na posição 1 (Prot-Hex1-Desv1) resultou em um aumento significativo no deslocamento (+43,8%), acompanhado de um aumento de 6,0% na carga máxima suportada. Esse comportamento sugere que, embora a viga tenha se tornado menos rígida, a redistribuição dos esforços favoreceu a capacidade de carga. Esse efeito se manteve nas configurações com desviadores nas posições 1 e 2 (Prot-Hex1-Desv12) e 1, 2 e 3 (Prot-Hex1-Desv123), onde o deslocamento máximo apresentou reduções progressivas para 35,3% e 33,7%, respectivamente, enquanto a capacidade de carga aumentou 7,6% e 8,8%, confirmando que a adição de múltiplos desviadores melhora o desempenho estrutural sem comprometer a resistência.

A configuração Prot-Hex1-Desv123-Cabo, que incorporou protensão apenas na parte intermediária da viga, resultou em um aumento de 51,7% no deslocamento e uma redução de 8,7% na carga máxima suportada. Isso indica que a protensão localizada pode não ser eficaz na estabilização global da estrutura, causando maior deformação sem ganhos significativos na resistência.

A modificação mais eficiente foi a Prot-Hex1-Desv123-X, na qual os alvéolos externos foram fechados com barras em X. Essa configuração reduziu o deslocamento em 18,0% e aumentou a carga máxima em 11,3%, sugerindo que o fechamento dos alvéolos melhorou a distribuição de esforços e aumentou a rigidez estrutural da viga. Por outro lado, a combinação de protensão

intermediária e fechamento dos alvéolos (Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X) apresentou a maior redução de deslocamento (-19,8%), mas comprometeu a capacidade de carga, que caiu 11,9%. Esse comportamento indica que, embora a combinação de reforços estruturais aumente a rigidez da viga, pode comprometer sua eficiência na redistribuição dos esforços, resultando em uma menor capacidade de carga.

Os resultados demonstram que a adição progressiva de desviadores intermediários melhora a capacidade de carga das ViMAPs com alvéolos hexagonais, com ganhos mais expressivos quando distribuídos em múltiplas posições. O fechamento dos alvéolos externos com barras em X apresentou os melhores resultados em termos de redução de deslocamentos e aumento da resistência, enquanto a protensão intermediária isolada não trouxe benefícios significativos e, em alguns casos, comprometeu a eficiência estrutural da viga. Assim, a configuração Prot-Hex1-Desv123-X se mostrou a mais eficiente para otimizar a rigidez e a capacidade de carga, enquanto a Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X, apesar de melhorar a estabilidade, não apresentou os melhores resultados em termos de resistência global da estrutura.

A Tabela 6.75 apresenta a comparação das tensões máximas (Von Mises, longitudinais S11 e cisalhantes S12) em ViMAPs com alvéolos hexagonais, considerando a adição de múltiplos desviadores extras e modificações nos alvéolos externos e na aplicação de protensão intermediária.

As tensões Von (Figura 6.100) aumentaram em até 3% com a adição do primeiro par de desviadores (Prot-Hex1-Desv1), sugerindo uma maior concentração de esforços nas regiões dos alvéolos. No entanto, conforme novos desviadores foram inseridos (Prot-Hex1-Desv123), houve uma redução de 5% nas tensões Von Mises, indicando que a redistribuição dos esforços se tornou mais eficiente. A introdução da protensão intermediária (Prot-Hex1-Desv123-Cabo) resultou no maior aumento das tensões Von Mises (+6%), evidenciando que essa modificação intensificou as tensões no aço, possivelmente devido à rigidez imposta pela protensão localizada. O fechamento dos alvéolos externos com barras em X (Prot-Hex1-Desv123-X) mostrou um comportamento semelhante ao da viga sem protensão intermediária, mantendo uma redução de 5% nas tensões Von Mises.

As tensões longitudinais (S11) (Figura 6.101) permaneceram praticamente inalteradas na maioria das configurações, com variações próximas de 0% para a maioria dos casos. O único

aumento expressivo ocorreu na Prot-Hex1-Desv123-Cabo, onde houve um acréscimo de 7%, indicando que a protensão intermediária intensificou os esforços longitudinais na viga. Por outro lado, a configuração Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X apresentou uma leve redução de 2% nas tensões longitudinais, indicando que o fechamento dos alvéolos externos suavizou parte desses esforços.

As tensões cisalhantes (S12) (Figura 6.102) apresentaram reduções expressivas conforme os desviadores foram adicionados. A configuração Prot-Hex1-Desv123 resultou em uma redução de 7%, enquanto a Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X obteve a maior redução, chegando a 10%. Isso demonstra que a adição progressiva de desviadores e o fechamento dos alvéolos externos ajudam a reduzir significativamente as tensões cisalhantes, melhorando a estabilidade estrutural da viga. A única configuração que apresentou aumento significativo nas tensões cisalhantes foi Prot-Hex1-Desv1 (+3%), o que indica que a inserção de um único par de desviadores não é suficiente para redistribuir adequadamente os esforços internos.

Tabela 6.75 - Comparação das tensões máximas [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

	Viga	Von Mises	%	Tensão longitudinal (S11)	%	Tensão cisalhante (S12)	%
18	Prot-Hex1	460,5	-	472,3	-	263,6	-
53	Prot-Hex1-Desv1	476,2	+3%	472,9	0%	272,1	+3%
70	Prot-Hex1-Desv12	459,9	0%	474,3	0%	265,3	+1%
71	Prot-Hex1-Desv123	436,0	-5%	473,6	0%	244,8	-7%
72	Prot-Hex1-Desv123-Cabo	486,6	+6%	504,4	+7%	237,2	-10%
73	Prot-Hex1-Desv123-X	437,7	-5%	473,3	0%	244,0	-7%
74	Prot-Hex1-Desv123-Cabo-X	440,3	-4%	465,1	-2%	236,9	-10%

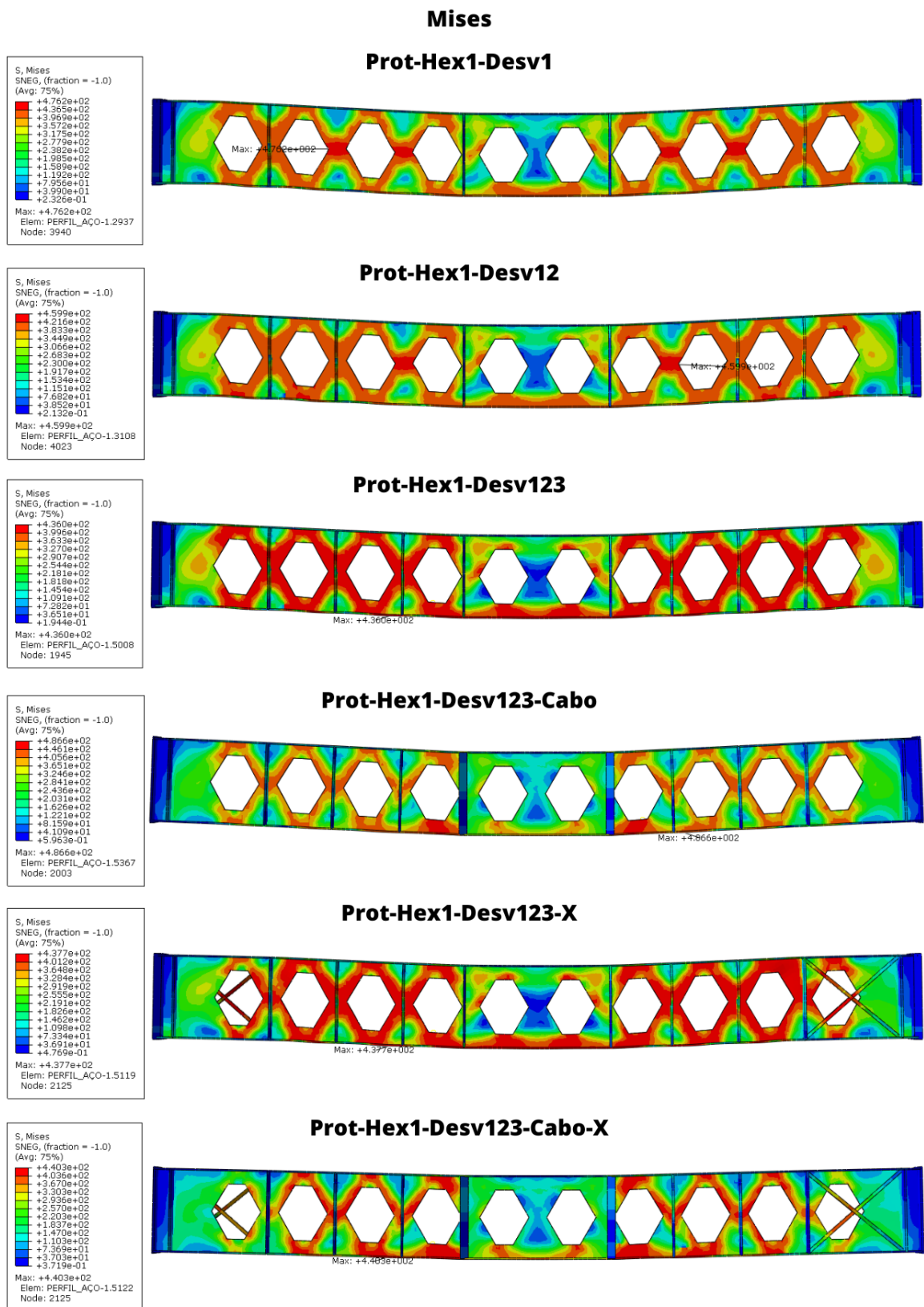


Figura 6.100 - Distribuição de tensão Von Mises [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.

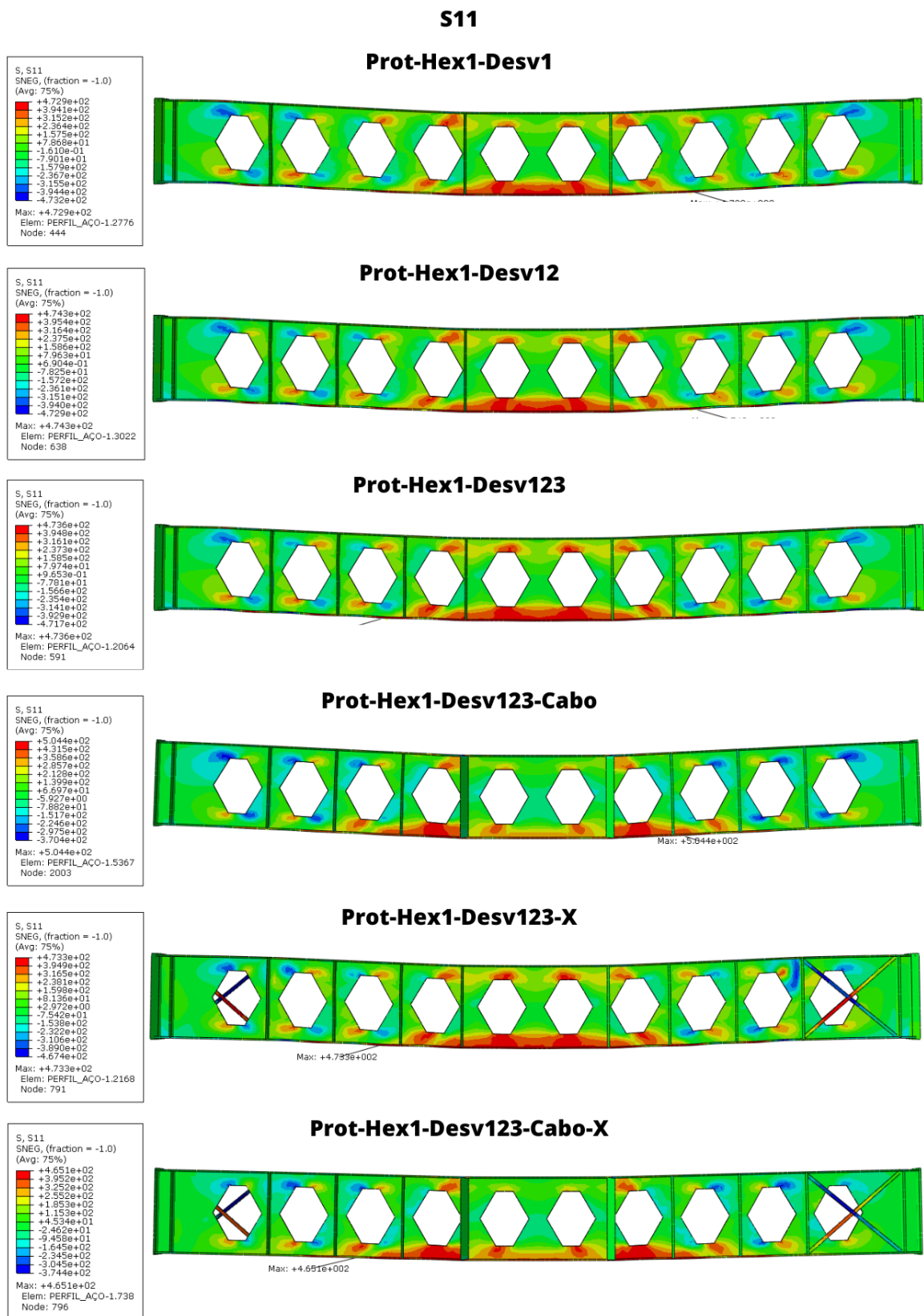


Figura 6.101 - Distribuição de tensão longitudinal (S11) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.



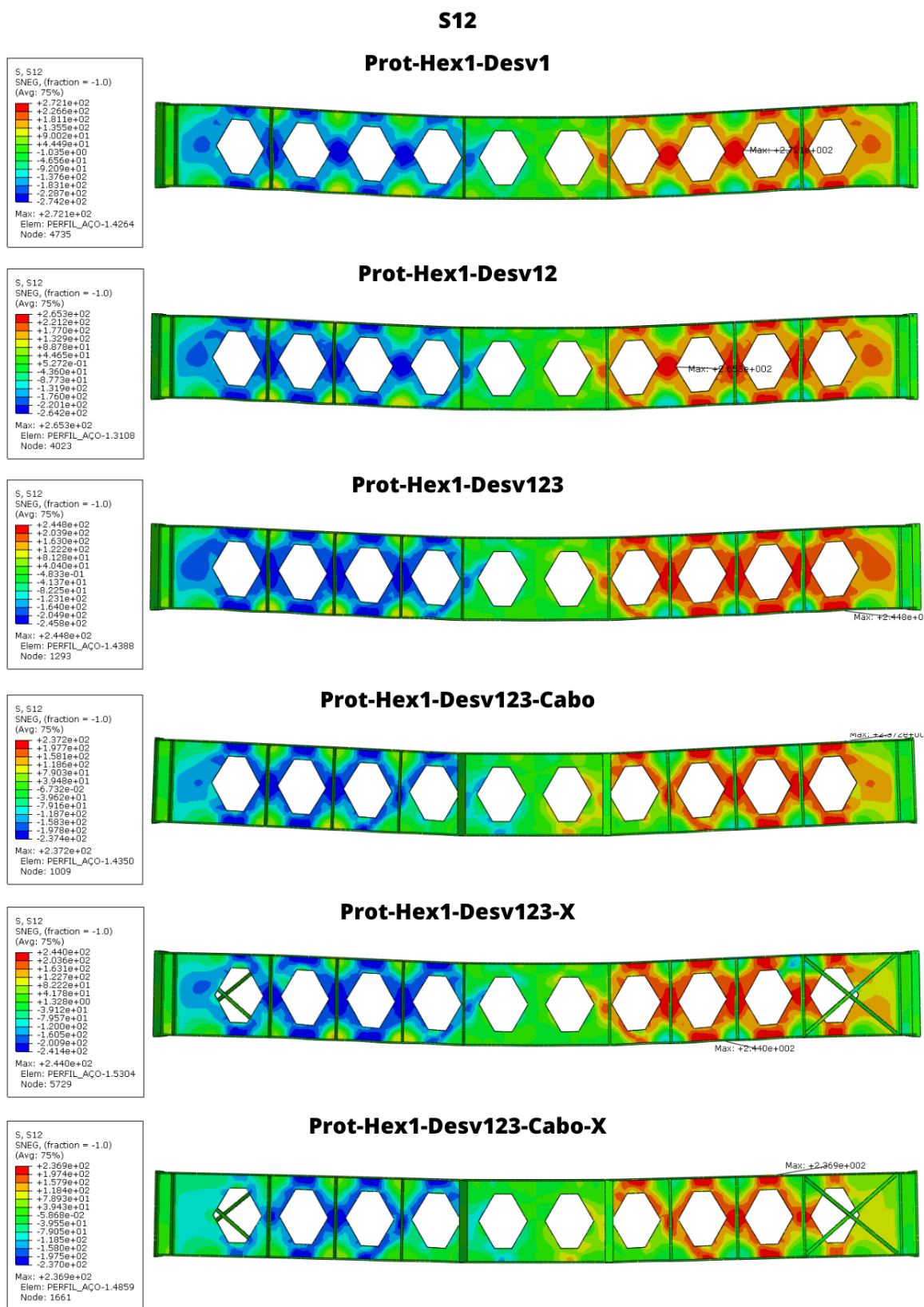


Figura 6.102 - Distribuição de tensão cisalhante (S12) [MPa] em ViMAPs com alvéolos hexagonais com múltiplos desviadores extras e alterações na viga.



## 7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo principal de analisar o comportamento estrutural e de tensões e deformações de vigas mistas alveolares protendidas de aço-concreto (ViMAPs). A escassez de estudos sobre o assunto nas bases de dados (WoS e Scopus) mostra a lacuna de conhecimento sobre a junção dos métodos sobre vigas mistas de aço-concreto, com alvéolos no perfil e protensão.

Inicialmente, uma viga mista de aço-concreto, com protensão reta, biapoiada e com duas cargas concentradas foi modelada utilizando o software ABAQUS e validada pelo modelo experimental encontrado na literatura, onde a comparação entre os resultados demonstrou uma boa convergência, validando a precisão dos modelos de elementos desenvolvidos.

Os resultados obtidos indicam que a modelagem numérica no ABAQUS pode ser utilizada com confiabilidade para prever o comportamento estrutural de ViMAPs, sendo uma ferramenta essencial para o aprimoramento do projeto dessas vigas. Os resultados da presente pesquisa podem seguir como indicativo/orientação para futuros estudos numéricos experimentais.

Em seguida, foi investigado o impacto de diferentes parâmetros geométricos e estruturais na eficiência estrutural dessas vigas. No total 74 modelos numéricos tridimensionais foram desenvolvidos, permitindo assim a simulação detalhada de deslocamentos, capacidade de carga e distribuição de tensões. A partir das análises realizadas, foi possível identificar tendências e fatores críticos que afetam o desempenho dessas estruturas e consequentemente sugerir dispositivos e ações para melhorar o desempenho estrutural da ViMAPs.

A análise dos diferentes formatos de alvéolos evidenciou que cada geometria possui particularidades relevantes, tanto em vigas sem protensão quanto nas protendidas. Os furos hexagonais apresentaram o melhor desempenho global, alcançando a maior capacidade resistente em todas as comparações. A introdução de desviadores intermediários favoreceu especialmente os alvéolos circulares, pois atenuou as concentrações de tensões cisalhantes e, consequentemente, elevou sua eficiência. Já os formatos diamante e retangular, embora ofereçam maior rigidez em determinadas configurações, mostraram-se mais suscetíveis a picos de cisalhamento, exigindo cuidados adicionais no dimensionamento e detalhamento.

A variação do tamanho dos alvéolos foi outro fator determinante no comportamento das ViMAPs. Levando em conta apenas a redução das dimensões dos alvéolos (sem levar em conta a proporção necessária no acastelamento), ao reduzir o tamanho das aberturas para 75% da altura do alvéolo original, observou-se um melhor equilíbrio entre rigidez e resistência, enquanto reduções para 50% não foram tão eficientes em termos de capacidade de carga. O alvéolo com tamanho 100% da altura original resultou em perda significativa de rigidez, especialmente nas vigas sem protensão. Assim, a redução progressiva do diâmetro/altura dos alvéolos para 75 % e 50 % revelou que a economia de peso só compensa até 25 % de redução; abaixo disso, a perda de rigidez supera o ganho de leveza.

Para a geometria e carregamento aqui considerados, o espaçamento entre os centros dos alvéolos também foi objeto de estudo desse trabalho e se mostrou um fator crítico para a capacidade de carga da viga. Espaçamentos menores (120 mm) reduziram a rigidez global, favorecendo deslocamentos excessivos e maiores concentrações de tensões, pois resulta em menor área de aço entre os furos. Espaçamentos intermediários (150 mm) proporcionaram melhor equilíbrio entre rigidez e resistência. O espaçamento de 200 mm demonstrou-se o mais eficiente em termos de capacidade de carga e redistribuição de tensões, sendo a configuração mais indicada para maximizar o desempenho estrutural.

Para esse tipo de estrutura analisada, a remoção seletiva de alvéolos nas extremidades revelou-se uma estratégia eficaz para mitigar zonas críticas de concentração de tensões. Tanto para alvéolos circulares quanto hexagonais, essa remoção resultou em uma redução expressiva das tensões de Von Mises e tensões cisalhantes, aumentando a eficiência estrutural da viga. A remoção de dois alvéolos das estruturas aqui estudadas em cada extremidade mostrou-se suficiente para garantir esse efeito, sem comprometer significativamente a redução de peso da estrutura.

A influência da protensão foi outro fator fundamental nesta pesquisa. A presença protensão total e reta aumentou aproximadamente 30% na capacidade de carga para a viga padrão, chegando a 32% com a presença de alvéolos hexagonais. Além de reduzir os deslocamentos e melhorando a redistribuição dos esforços. A análise comparativa entre vigas totalmente protendidas e vigas com protensão apenas na região intermediária mostrou que a protensão total é mais eficiente, com um aumento na capacidade de carga de 16%, garantindo um melhor

desempenho geral. No entanto, a protensão localizada pode ser uma alternativa viável em casos em que a redução de material for necessária, com redução aproximadamente 1/4 no comprimento de cabo de aço.

A adição de desviadores intermediários foi um fator determinante na redistribuição dos esforços internos das ViMAPs. A introdução de apenas um par de desviadores (posição Desv1 – entre os furos mais próximos ao apoio) teve efeito limitado e, em alguns casos, houve a ruptura prematura do sistema. No entanto, a distribuição dos desviadores em múltiplas posições ao longo da viga (Desv12, Desv123), seguindo a sequência do apoio para o centro da viga, resultou em melhora no desempenho estrutural, com reduções superiores a -30% nos deslocamentos e aumentos de até +11% na carga máxima aplicada.

As modificações nos alvéolos mais próximo do apoio da viga também se mostraram eficazes. A remoção dos dois alvéolos nas extremidades contribuiu para a melhoria da rigidez estrutural sem comprometer significativamente a resistência, e a redução do tamanho desses alvéolos apresentou desempenho semelhante. A viga com alvéolos hexagonais e removendo os dois furos nos apoios (Prot-Hex1-4alv) gerou uma viga com elevada capacidade de carga, atingindo 849kN, 18% maior que o perfil padrão protendido.

Já o fechamento com contraventamento usando barras de seção retangular em formato de X, apesar de promover a maior redução de deslocamentos, resultou em perda de capacidade de carga em algumas configurações, como nos casos Prot-Circ1-Desv1-X e Prot-Hex1-Desv1-X que sofreram ruptura prematura da estrutura, sugerindo que essa estratégia deve ser aplicada com cautela e em conjunto com outros mecanismos estruturais.

Para que a força de protensão seja transferida com segurança ao perfil, os enrijecedores de ancoragem devem apresentar elevada rigidez tanto à compressão quanto à distorção da alma e das mesas. Placas soldadas integralmente à alma e às mesas, com espessura não inferior à da própria alma e cordões de solda contínuos, evitam concentrações excessivas de tensões no bloco-âncora e limitam a deformação do furo de passagem do cabo. O mesmo deve ser levado em consideração para a fixação dos desviadores dos cabos de protensão que também atuam como enrijecedores intermediários.

A adição de 6 pares de enrijecedores extras gerou um aumento de +9% e +11% para as vigas com alvéolos hexagonais e circulares respectivamente (Prot-Hex1-Desv123 e Prot-Circ1-Desv123), quando comparada a viga apenas com alvéolos sem desviadores adicionais (Prot-Hex1 e Prot-Circ1), apesar de ter ocasionado um aumento de aproximadamente +13% no peso do perfil de aço.

Os maiores valores de capacidade resistente foram alcançados por duas configurações-chave. Entre as vigas protendidas, destacou-se a variante Prot-Hex1-e200: a combinação de alvéolos hexagonais de altura integral, espaçados a 200 mm, protensão reta e quatro desviadores levou a carga última a 862 kN, cerca de +20 % acima do perfil padrão protendido. No conjunto sem protensão, o melhor desempenho foi obtido pela SP-Diam1, cujo arranjo de alvéolos em forma de diamante, atingiu 858 kN. Esses resultados confirmam que, quando devidamente dimensionados, os alvéolos conseguem explorar ao máximo a altura útil do perfil, retardando o mecanismo Vierendeel e postergando a plastificação do banzo comprimido.

Em termos de tensões, observou-se que as tensões cisalhantes (S12 – sentido 1 longitudinal do perfil e 2 vertical da alma) foram as mais sensíveis às modificações estruturais, sendo eficazmente reduzidas com o uso de desviadores múltiplos e estratégias combinadas de protensão e reforço dos alvéolos. Já as tensões longitudinais (S11) mantiveram-se praticamente constantes na maioria das análises, evidenciando que o principal impacto das estratégias propostas ocorre na redistribuição transversal dos esforços.

Em termos de aplicabilidade prática, os achados desta pesquisa sugerem que as ViMAPs constituem uma solução estrutural viável e eficiente para pontes, passarelas e edifícios industriais, especialmente quando projetadas com otimização do formato, tamanho, altura e espaçamento dos alvéolos. A adoção de estratégias como remoção seletiva de alvéolos nas extremidades e protensão aplicada de forma completa mostrou-se crucial para maximizar o desempenho estrutural e econômico dessas vigas.

Entre as limitações da pesquisa, destaca-se a ausência de ensaios experimentais complementares para validação direta dos modelos numéricos aqui estudados. No entanto, a consistência dos resultados e sua comparação com estudos prévios indicam boa confiabilidade das análises realizadas.

Espera-se que, por fim, esta pesquisa tenha contribuído para um melhor entendimento do comportamento estrutural das ViMAPs, fornecendo, desta forma, diretrizes técnicas para projetos mais eficientes e seguros. Os resultados apresentados representam um avanço técnico e científico na engenharia estrutural, abrindo caminho para novas investigações e aplicações práticas, promovendo maior eficiência e segurança nas estruturas mistas aço-concreto.

## 7.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados desta pesquisa e nas lacunas ainda existentes, diversas possibilidades para estudos futuros podem ser exploradas. A primeira delas envolve a validação experimental das ViMAPs, por meio de ensaios físicos que possam comprovar a precisão dos modelos numéricos desenvolvidos, além da investigação da influência de diferentes condições de carregamento e apoio na resposta estrutural das vigas.

O comportamento em serviço requer atenção especial aos efeitos de longa duração. A perda gradual de força nos cabos, aliada à fluência e retração do concreto, pode comprometer a rigidez e aumentar as flechas de serviço. Monitoramentos de campo por períodos superiores a dois anos, correlacionando variações de tensão nos cabos com deslocamentos e abertura de fissuras, permitirão estabelecer coeficientes de redução para o dimensionamento em Estado Limite de Serviço, além de avaliar a durabilidade em ambientes agressivos.

No âmbito do desempenho estrutural ótimo, recomenda-se desenvolver algoritmos de otimização da geometria dos alvéolos e da distribuição da protensão. Podem ser geradas configurações que minimizem massa e custo, mantendo rigidez e capacidade dentro de metas de projeto. A partir desses resultados, podem ser propostas equações empíricas ou modelos que atualizem as prescrições de dimensionamento. Além do estudo do custo de implementação dessa viga para mensurar a viabilidade do projeto.

A estabilidade local e global das ViMAPs, especialmente dos enrijecedores de ancoragem e da alma recortada, merece investigação específica. Estudos numérico-experimentais podem mapear os limites de flambagem lateral-torsional em perfis alveolares protendidos e avaliar a eficácia de enrijecedores de borda ou travamentos em X instalados entre as mesas. Tais dispositivos podem reduzir deslocamentos fora do plano e elevar a reserva de rigidez em

situações de carregamento assimétrico. Inclusive, testar outros tipos de contraventamentos, como o fechamento com barras de aço em X ao redor das bordas dos furos.

Por fim, uma importante linha de pesquisa futura envolve a aplicação das ViMAPs em estruturas reais, avaliando seu real desempenho em projetos. Esse estudo poderia fornecer informações essenciais para o desenvolvimento de diretrizes normativas que auxiliem na padronização do dimensionamento e na ampliação do uso dessas vigas na engenharia estrutural. Dessa forma, os estudos futuros podem consolidar ainda mais o conhecimento sobre as ViMAPs, promovendo sua aplicação prática e contribuindo para soluções estruturais inovadoras e eficientes.

## ANEXO A – NOMENCLATURA E DESCRIÇÃO DE TODAS AS VIGAS MODELADAS

	Nomenclatura	Descrição
<b>1</b>	SP-Padrão	Viga inteira sem alvéolos e sem protensão.
<b>2</b>	SP-Circ1	Viga padrão acastelada, com alvéolos circulares e sem protensão
<b>3</b>	SP-Circ2	Viga menor acastelada, com alvéolos circulares e sem protensão
<b>4</b>	SP-Circ3	Viga comercial acastelada, com alvéolos circulares e sem protensão
<b>5</b>	SP-Hex1	Viga padrão acastelada, com alvéolos hexagonais e sem protensão
<b>6</b>	SP-Hex2	Viga menor acastelada, com alvéolos hexagonais e sem protensão
<b>7</b>	SP-Hex3	Viga comercial acastelada, com alvéolos hexagonais e sem protensão
<b>8</b>	SP-Diam1	Viga padrão acastelada, com alvéolos diamantes e sem protensão
<b>9</b>	SP-Diam2	Viga menor acastelada, com alvéolos diamantes e sem protensão
<b>10</b>	SP-Diam3	Viga comercial acastelada, com alvéolos diamantes e sem protensão
<b>11</b>	SP-Ret1	Viga padrão acastelada, com alvéolos retangulares e sem protensão
<b>12</b>	SP-Ret2	Viga menor acastelada, com alvéolos retangulares e sem protensão
<b>13</b>	SP-Ret3	Viga comercial acastelada, com alvéolos retangulares e sem protensão
<b>14</b>	Prot-Padrão	Viga inteira sem alvéolos e com protensão.
<b>15</b>	Prot-Circ1	Viga padrão acastelada, com alvéolos circulares e com protensão
<b>16</b>	Prot-Circ2	Viga menor acastelada, com alvéolos circulares e com protensão
<b>17</b>	Prot-Circ3	Viga comercial acastelada, com alvéolos circulares e com protensão

	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
<b>18</b>	Prot-Hex1	Viga padrão acastelada, com alvéolos hexagonais e com protensão
<b>19</b>	Prot-Hex2	Viga menor acastelada, com alvéolos hexagonais e com protensão
<b>20</b>	Prot-Hex3	Viga comercial acastelada, com alvéolos hexagonais e com protensão
<b>21</b>	Prot-Diam1	Viga padrão acastelada, com alvéolos diamantes e com protensão
<b>22</b>	Prot-Diam2	Viga menor acastelada, com alvéolos diamantes e com protensão
<b>23</b>	Prot-Diam3	Viga comercial acastelada, com alvéolos diamantes e com protensão
<b>24</b>	Prot-Ret1	Viga padrão acastelada, com alvéolos retangulares e com protensão
<b>25</b>	Prot-Ret2	Viga menor acastelada, com alvéolos retangulares e com protensão
<b>26</b>	Prot-Ret3	Viga comercial acastelada, com alvéolos retangulares e com protensão
<b>27</b>	Prot-Circ2-100%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos circulares tamanho 100%
<b>28</b>	Prot-Hex2-100%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos hexagonais tamanho 100%
<b>29</b>	Prot-Diam2-100%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos diamante tamanho 100%
<b>30</b>	Prot-Ret2-100%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos retangulares tamanho 100%
<b>31</b>	Prot-Circ2-75%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos circulares tamanho 75%
<b>32</b>	Prot-Hex2-75%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos hexagonais tamanho 75%
<b>33</b>	Prot-Diam2-75%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos diamante tamanho 75%
<b>34</b>	Prot-Ret2-75%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos retangulares tamanho 75%
<b>35</b>	Prot-Circ2-50%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos circulares tamanho 50%
<b>36</b>	Prot-Hex2-50%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos hexagonais tamanho 50%



	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
<b>37</b>	Prot-Diam2-50%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos diamante tamanho 50%
<b>38</b>	Prot-Ret2-50%	Viga menor acastelada protendida com alvéolos retangulares tamanho 50%
<b>39</b>	Prot-Circ1-e120	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e espaçamento 120mm
<b>40</b>	Prot-Circ1-e150	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e espaçamento 150mm
<b>41</b>	Prot-Circ1-e200	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e espaçamento 200mm
<b>42</b>	Prot-Hex1-e120	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e espaçamento 120mm
<b>43</b>	Prot-Hex1-e150	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e espaçamento 150mm
<b>44</b>	Prot-Hex1-e200	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e espaçamento 200mm
<b>45</b>	Prot-Circ1-2alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e sem os 2 furos externos
<b>46</b>	Prot-Circ1-4alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e sem os 4 furos externos
<b>47</b>	Prot-Hex1-2alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e sem os 2 furos externos
<b>48</b>	Prot-Hex1-4alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e sem os 4 furos externos
<b>49</b>	Prot-Circ1-Desv1	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e um par desviadores extra na posição 1
<b>50</b>	Prot-Circ1-Desv2	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e um par desviadores extra na posição 2
<b>51</b>	Prot-Circ1-Desv3	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e um par desviadores extra na posição 3
<b>52</b>	Prot-Circ1-Desv4	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e um par desviadores extra na posição 4
<b>53</b>	Prot-Hex1-Desv1	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e um par desviadores extra na posição 1
<b>54</b>	Prot-Hex1-Desv2	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e um par desviadores extra na posição 2
<b>55</b>	Prot-Hex1-Desv3	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e um par desviadores extra na posição 3
<b>56</b>	Prot-Hex1-Desv4	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e um par desviadores extra na posição 4

<b>Nomenclatura</b>		<b>Descrição</b>
<b>57</b>	Prot-Circ1-Desv1-2alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, um par desviadores extra na posição 1 e sem os 2 furos externos
<b>58</b>	Prot-Circ1-Desv1-Menor	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, um par desviadores extra na posição 1 e os 2 furos externos com 75% do tamanho
<b>59</b>	Prot-Circ1-Desv1-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, um par desviadores extra na posição 1 e os 2 furos externos fechados em X
<b>60</b>	Prot-Circ1-Desv1-Cabo	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, um par desviadores extra na posição 1 e com cabo de protensão apenas na parte intermediário
<b>61</b>	Prot-Hex1-Desv-2alv	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, um par desviadores extra na posição 1 e sem os 2 furos externos
<b>62</b>	Prot-Hex1-Desv-Menor	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, um par desviadores extra na posição 1 e os 2 furos externos com 75% do tamanho
<b>63</b>	Prot-Hex1-Desv1-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, um par desviadores extra na posição 1 e os 2 furos externos fechados em X
<b>64</b>	Prot-Hex1-Desv1-Cabo	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, um par desviadores extra na posição 1 e com cabo de protensão apenas na parte intermediária
<b>65</b>	Prot-Circ1-Desv12	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e dois pares de desviadores extras nas posições 1 e 2
<b>66</b>	Prot-Circ1-Desv123	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares e dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3
<b>67</b>	Prot-Circ1-Desv123-Cabo	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, e com cabo de protensão apenas na parte intermediária
<b>68</b>	Prot-Circ1-Desv123-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, e os dois furos externos fechados em X
<b>69</b>	Prot-Circ1-Desv123-Cabo-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos circulares, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, com cabo de protensão apenas na parte intermediária e os dois furos externos fechados em X
<b>70</b>	Prot-Hex1-Desv12	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e dois pares de desviadores extras nas posições 1 e 2
<b>71</b>	Prot-Hex1-Desv123	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais e dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3
<b>72</b>	Prot-Hex1-Desv123-Cabo	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, e com cabo de protensão apenas na parte intermediária

	<b>Nomenclatura</b>	<b>Descrição</b>
<b>73</b>	Prot-Hex1- Desv123-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, e os dois furos externos fechados em X
<b>74</b>	Prot-Hex1- Desv123-Cabo-X	Viga padrão acastelada protendida, com alvéolos hexagonais, dois pares de desviadores extras nas posições 1, 2 e 3, com cabo de protensão apenas na parte intermediária e os dois furos externos fechados em X

## ANEXO B – DADOS DE TODAS AS VIGAS MODELADAS

	Viga	Desloc. Máx.	%	Carga máxima	%	Peso	%	Altura	%	Von Mises	%	Tensão Longit.	%	Tensão Cisal.	%
1	SP-Padrão	61,40	18%	560,02	-22%	221,75	0%	352,00	0%	413,40	0%	450,60	0%	163,20	-17%
2	SP-Circ1	112,19	116%	558,38	-23%	221,04	0%	519,70	48%	470,40	14%	472,30	5%	260,60	32%
3	SP-Circ2	103,45	99%	436,91	-39%	191,11	-14%	352,00	0%	436,90	6%	468,10	4%	237,40	20%
4	SP-Circ3	109,78	111%	391,67	-46%	154,47	-30%	314,68	-11%	442,10	7%	471,80	5%	239,10	21%
5	SP-Hex1	89,36	72%	636,59	-12%	233,57	5%	525,20	49%	455,80	11%	467,40	4%	240,30	21%
6	SP-Hex2	100,08	93%	422,62	-41%	191,17	-14%	352,00	0%	451,20	10%	472,70	5%	233,70	18%
7	SP-Hex3	100,40	93%	418,83	-42%	152,73	-31%	338,57	-4%	443,70	8%	473,20	5%	235,90	19%
8	SP-Diam1	79,28	53%	670,78	-7%	243,74	10%	525,20	49%	475,30	15%	492,50	10%	237,00	20%
9	SP-Diam2	97,14	87%	438,94	-39%	198,76	-10%	352,00	0%	455,80	11%	487,90	9%	237,60	20%
10	SP-Diam3	99,72	92%	434,39	-40%	160,33	-28%	338,57	-4%	450,90	10%	473,50	5%	239,60	21%
11	SP-Ret1	128,59	148%	358,27	-50%	215,08	-3%	525,20	49%	494,10	20%	477,50	6%	227,50	15%
12	SP-Ret2	176,90	241%	231,92	-68%	175,98	-21%	352,00	0%	463,00	12%	473,50	5%	235,40	19%
13	SP-Ret3	170,79	229%	219,74	-70%	137,55	-38%	338,57	-4%	453,60	10%	473,60	5%	226,70	15%
<b>14</b>	<b>Prot-Padrão</b>	<b>51,93</b>	<b>0%</b>	<b>721,18</b>	<b>0%</b>	<b>221,75</b>	<b>0%</b>	<b>352,00</b>	<b>0%</b>	<b>411,60</b>	<b>0%</b>	<b>449,00</b>	<b>0%</b>	<b>197,80</b>	<b>0%</b>
15	Prot-Circ1	112,04	116%	570,77	-21%	221,04	0%	519,70	48%	478,60	16%	472,10	5%	263,20	33%
16	Prot-Circ2	99,17	91%	474,19	-34%	191,11	-14%	352,00	0%	458,50	11%	474,40	6%	247,10	25%
17	Prot-Circ3	98,19	89%	409,36	-43%	154,47	-30%	314,68	-11%	454,20	10%	473,60	5%	245,50	24%
18	Prot-Hex1	56,23	8%	737,09	2%	233,57	5%	525,20	49%	460,50	12%	472,30	5%	263,60	33%
19	Prot-Hex2	105,75	104%	529,05	-27%	191,17	-14%	352,00	0%	455,80	11%	472,70	5%	255,60	29%
20	Prot-Hex3	113,73	119%	496,57	-31%	152,73	-31%	338,57	-4%	467,90	14%	473,30	5%	260,50	32%

	<b>Viga</b>	<b>Desloc. Máx.</b>	<b>%</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>%</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>Altura</b>	<b>%</b>	<b>Von Mises</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Longit.</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Cisal.</b>	<b>%</b>
21	Prot-Diam1	71,27	37%	858,15	19%	243,74	10%	525,20	49%	491,70	19%	456,80	2%	280,50	42%
22	Prot-Diam2	99,83	92%	577,84	-20%	198,76	-10%	352,00	0%	470,10	14%	471,80	5%	269,70	36%
23	Prot-Diam3	93,82	81%	542,26	-25%	160,33	-28%	338,57	-4%	482,30	17%	470,60	5%	277,30	40%
24	Prot-Ret1	123,91	139%	355,70	-51%	215,08	-3%	525,20	49%	472,80	15%	478,50	7%	224,80	14%
25	Prot-Ret2	176,31	240%	231,13	-68%	175,98	-21%	352,00	0%	463,80	13%	473,70	6%	236,70	20%
26	Prot-Ret3	166,26	220%	218,99	-70%	137,55	-38%	338,57	-4%	452,80	10%	472,90	5%	224,30	13%
27	Prot-Circ2-100%	99,17	91%	474,19	-34%	191,11	-14%	352,00	0%	458,50	11%	474,40	6%	247,10	25%
28	Prot-Hex2-100%	105,75	104%	529,05	-27%	191,17	-14%	352,00	0%	470,10	14%	471,80	5%	269,70	36%
29	Prot-Diam2-100%	99,83	92%	577,84	-20%	198,76	-10%	352,00	0%	455,80	11%	472,70	5%	255,60	29%
30	Prot-Ret2-100%	176,31	240%	231,13	-68%	175,98	-21%	352,00	0%	463,80	13%	473,70	6%	236,70	20%
31	Prot-Circ2-75%	69,81	34%	637,77	-12%	198,72	-10%	352,00	0%	428,50	4%	452,70	1%	233,80	18%
32	Prot-Hex2-75%	65,82	27%	620,38	-14%	198,76	-10%	352,00	0%	433,10	5%	464,40	3%	236,30	19%
33	Prot-Diam2-75%	61,96	19%	635,45	-12%	204,46	-8%	352,00	0%	442,90	8%	458,20	2%	237,50	20%
34	Prot-Ret2-75%	102,73	98%	510,47	-29%	187,37	-16%	352,00	0%	452,60	10%	470,40	5%	244,00	23%
35	Prot-Circ2-50%	57,88	11%	671,24	-7%	206,33	-7%	352,00	0%	432,60	5%	471,20	5%	226,10	14%
36	Prot-Hex2-50%	58,92	13%	659,07	-9%	206,36	-7%	352,00	0%	431,40	5%	473,50	5%	228,60	16%
37	Prot-Diam2-50%	57,57	11%	670,18	-7%	210,15	-5%	352,00	0%	432,00	5%	475,00	6%	233,30	18%
38	Prot-Ret2-50%	61,76	19%	653,39	-9%	198,76	-10%	352,00	0%	424,50	3%	447,70	0%	237,60	20%
39	Prot-Circ1-e120	57,69	11%	628,09	-13%	231,32	4%	525,20	49%	460,00	12%	464,90	4%	252,70	28%
40	Prot-Circ1-e150	82,99	60%	712,18	-1%	231,32	4%	525,20	49%	467,30	14%	465,40	4%	268,20	36%
41	Prot-Circ1-e200	67,18	29%	757,62	5%	231,32	4%	525,20	49%	440,00	7%	473,20	5%	253,50	28%
42	Prot-Hex1-e120	37,78	-27%	767,04	6%	241,34	9%	525,20	49%	438,60	7%	471,40	5%	252,50	28%
43	Prot-Hex1-e150	53,07	2%	819,56	14%	241,34	9%	525,20	49%	440,50	7%	473,00	5%	253,30	28%
44	Prot-Hex1-e200	77,72	50%	862,15	20%	241,34	9%	525,20	49%	434,30	6%	472,10	5%	246,40	25%

	<b>Viga</b>	<b>Desloc. Máx.</b>	<b>%</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>%</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>Altura</b>	<b>%</b>	<b>Von Mises</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Longit.</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Cisal.</b>	<b>%</b>
45	Prot-Circ1-2alv	79,23	53%	620,26	-14%	231,32	4%	525,20	49%	469,60	14%	471,70	5%	262,30	33%
46	Prot-Circ1-4alv	48,76	-6%	713,95	-1%	241,59	9%	525,20	49%	453,60	10%	473,00	5%	256,10	29%
47	Prot-Hex1-2alv	44,66	-14%	769,82	7%	241,34	9%	525,20	49%	452,60	10%	472,60	5%	261,00	32%
48	Prot-Hex1-4alv	54,76	5%	849,66	18%	249,10	12%	525,20	49%	447,10	9%	472,80	5%	256,50	30%
49	Prot-Circ1- Desv1	105,93	104%	593,34	-18%	231,24	4%	525,20	49%	472,00	15%	472,70	5%	258,70	31%
50	Prot-Circ1- Desv2	102,65	98%	592,35	-18%	231,24	4%	525,20	49%	474,30	15%	472,10	5%	259,20	31%
51	Prot-Circ1- Desv3	106,96	106%	590,03	-18%	231,24	4%	525,20	49%	485,30	18%	471,60	5%	261,40	32%
52	Prot-Circ1- Desv4	112,69	117%	570,69	-21%	228,69	3%	525,20	49%	483,20	17%	471,80	5%	265,70	34%
53	Prot-Hex1-Desv1	80,83	56%	781,20	8%	243,77	10%	525,20	49%	476,20	16%	472,90	5%	272,10	38%
54	Prot-Hex1-Desv2	57,64	11%	758,52	5%	243,77	10%	525,20	49%	458,70	11%	471,80	5%	262,90	33%
55	Prot-Hex1-Desv3	59,84	15%	758,73	5%	243,77	10%	525,20	49%	466,60	13%	473,10	5%	266,80	35%
56	Prot-Hex1-Desv4	56,20	8%	737,32	2%	241,22	9%	525,20	49%	459,00	12%	471,70	5%	263,90	33%
57	Prot-Circ1- Desv1-2alv	79,26	53%	628,24	-13%	241,52	9%	525,20	49%	468,50	14%	463,50	3%	258,40	31%
58	Prot-Circ1- Desv1-Menor	79,42	53%	626,45	-13%	233,81	5%	525,20	49%	466,60	13%	461,80	3%	255,60	29%
59	Prot-Circ1- Desv1-X	11,92	-77%	408,73	-43%	237,89	7%	525,20	49%	411,60	0%	368,20	-18%	221,60	12%
60	Prot-Circ1- Desv1-Cabo	101,26	95%	575,29	-20%	231,24	4%	525,20	49%	463,00	12%	472,60	5%	255,70	29%
61	Prot-Hex1-Desv- 2alv	61,37	18%	801,82	11%	251,54	13%	525,20	49%	467,10	13%	472,20	5%	266,80	35%
62	Prot-Hex1-Desv- Menor	45,66	-12%	773,16	7%	245,71	11%	525,20	49%	451,00	10%	472,10	5%	259,10	31%
63	Prot-Hex1- Desv1-X	14,46	-72%	607,42	-16%	251,28	13%	525,20	49%	411,60	0%	440,40	-2%	237,20	20%

	<b>Viga</b>	<b>Desloc. Máx.</b>	<b>%</b>	<b>Carga máxima</b>	<b>%</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>	<b>Altura</b>	<b>%</b>	<b>Von Mises</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Longit.</b>	<b>%</b>	<b>Tensão Cisal.</b>	<b>%</b>
64	Prot-Hex1- Desv1-Cabo	82,38	59%	667,84	-7%	243,77	10%	525,20	49%	477,50	16%	493,50	10%	245,70	24%
65	Prot-Circ1- Desv12	104,21	101%	616,77	-14%	241,45	9%	525,20	49%	468,20	14%	472,30	5%	253,80	28%
66	Prot-Circ1- Desv123	94,16	81%	632,26	-12%	251,65	13%	525,20	49%	463,20	13%	472,50	5%	238,40	21%
67	Prot-Circ1- Desv123-Cabo	95,89	85%	611,41	-15%	251,65	13%	525,20	49%	455,60	11%	471,90	5%	237,60	20%
68	Prot-Circ1- Desv123-X	85,23	64%	662,68	-8%	258,29	16%	525,20	49%	470,00	14%	470,40	5%	238,60	21%
69	Prot-Circ1- Desv123-Cabo-X	71,03	37%	626,35	-13%	258,29	16%	525,20	49%	439,40	7%	470,50	5%	237,30	20%
70	Prot-Hex1- Desv12	76,08	47%	792,89	10%	253,97	15%	525,20	49%	459,90	12%	474,30	6%	265,30	34%
71	Prot-Hex1- Desv123	75,15	45%	801,59	11%	264,17	19%	525,20	49%	436,00	6%	473,60	5%	244,80	24%
72	Prot-Hex1- Desv123-Cabo	85,30	64%	673,11	-7%	264,17	19%	525,20	49%	486,60	18%	504,40	12%	237,20	20%
73	Prot-Hex1- Desv123-X	66,35	28%	820,26	14%	271,68	23%	525,20	49%	437,70	6%	473,30	5%	244,00	23%
74	Prot-Hex1- Desv123-Cabo-X	45,09	-13%	649,09	-10%	271,68	23%	525,20	49%	440,30	7%	465,10	4%	236,90	20%

## BIBLIOGRAFIA

ABAQUS. **User's Manual**. : Dessault Systèmes Simulia Corp, Version 6.14-4.Providence, RI, USA., 2014.

ABDELATIF, A. O.; OWEN, J. S.; HUSSEIN, M. F. M. Modelling the prestress transfer in pre-tensioned concrete elements. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 94, p. 47–63, fev. 2015.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: Brasil, 2008.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: Brasil, 2014.

ABNT, A. B. DE N. T. **NBR 7483 – Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido – Especificação**. Rio de Janeiro: Brasil, 2020.

AFEFY, H. M. E.-D.; ATTA, A. M.; TAHER, S. E.-D. F. Behavior of Strengthened Composite Castellated Beams Pre-stressed with External Bars: Experimental Study. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 37, n. 6, p. 1521–1534, set. 2012.

AISC, A. I. O. S. C. **Load and Resistance Factor Design Specification**. Chicago, USA: [s.n.].

ALHAMMADI, S. A. Numerical investigation into the effectiveness of steel i-beam strengthening techniques in steel-framed buildings. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 18, n. 7, p. 29, 2021.

ALI, A.; ZHIXIANG, Y. The Effects Of Partial Shear Connection On Composite Steelconcrete Beams Subjected To Combined Flexure In Yemen. **International Journal of Civil Engineering**, v. 7, n. 1, p. 117–146, 2010.

ALMINHANA, G. W. **Vigas metálicas alveoláres: Análise comparativa com vigas de alma cheia**. Monografia de Projeto Final—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.



ALVES, I. O. **Análise preliminar de vigas alveolares mistas protendidas para diferentes tipos de geometrias de alvéolos**. Monografia de Projeto Final—Brasília: Universidade de Brasília, 2018.

AMADIO, C.; AKKAD, N.; FASAN, M. **Three-dimensional numerical simulations of steel concrete composite beam-to-column welded and bolted joints**. . Em: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOR OF STEEL STRUCTURES IN SEISMIC AREAS. Shanghai: 2015.

AMINIAN, P. et al. New design equations for assessment of load carrying capacity of castellated steel beams: a machine learning approach. **Neural Computing and Applications**, v. 23, p. 119–131, 2013.

AWS, A. W. S. **ANSI/AWS C5.4-93. Recommended Practices For Stud Welding**: 8th Ed. Miami: Flórida, 1993.

AWS, A. W. S. **AWS D1.1/D1.1M:2010. Structural Welding Code – Steel**: 22nd Ed. Miami: Flórida, 2010.

AWS, A. W. S. **AASHTO/AWS D1.5M/D1.5:2020. Bridge Welding Code**: 8th Ed. Miami: Flórida, 2020.

AYYUB, B. M.; SOHN, Y. G.; SAADATMANESH, H. Prestressed Composite Girders under Positive Moment. **Journal of Structural Engineering**, v. 116, n. 11, p. 2931–2951, 1990.

BADKE-NETO, A. et al. **Visão didática de vigas de aço com aberturas sequenciais na alma: Casteladas e celulares**. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. **Anais...**Gramado: 2013.

BADKE-NETO, A.; CALENZANI, A. F. G.; FERREIRA, W. G. Estudo de metodologias para o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto com perfil celular. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 6, p. 843–859, dez. 2015.

BAKHTI, R. et al. New approach for computing damage parameters evolution in plastic damage model for concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00834, jun. 2022.

BARBOSA, W. C. DE S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto**. Tese de Doutorado—Brasília: Universidade de Brasília, 2016.

BELLETTI, B.; GASPERI, A. Behavior of Prestressed Steel Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 9, p. 1131–1139, 2010.

BENINCÁ, M. E.; MORSCH, I. B. Numerical simulation of composite steel-concrete alveolar beams: web-post buckling, Vierendeel and flexural mechanisms. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 17, n. 5, p. e289, 2020.

BEZERRA, E. M. **Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

BEZERRA, L. M. et al. V-shaped shear connector for composite steel-concrete beam. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 150, p. 162–174, 2018.

BI, R. et al. Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration. **Structures**, v. 29, p. 1137–1153, fev. 2021.

BUDI, L.; SUKAMTA; PARTONO, W. Optimization Analysis of Size and Distance of Hexagonal Hole in Castellated Steel Beams. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 1092–1099, 2017.

CAVALCANTE, O. R. DE O. E. **Estudo das tensões na solda da alma de vigas de aço alveolares em estruturas mistas**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2005.

CAVALCANTE, O. R. DE O. E. **Estudo de Conectores de Cisalhamento do Tipo “V” em Viga Mista**. Tese de Doutorado—Brasília: Universidade de Brasília, 2010.

CIMADEVILA, F. J. E.; GUTIÉRREZ, E. M.; RODRIGUEZ, J. A. V. **Vigas Alveoladas**. 1. ed. [s.l.] Bellisco, 2000. v. 3

COLDEBELLA, G. **Estudo experimental da transferência de forças de cisalhamento em pisos mistos de pequena altura com perfil celular de aço e lajes alveolares pré-fabricadas de concreto**. Tese de Doutorado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2019.

CRUZ, P. J. S. et al. **Desenvolvimentos recentes no domínio da conexão aço-concreto no contexto das estruturas mistas**. . Em: VI SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO. São Paulo: abr. 2006.

DENG, H. et al. **Analysis on Behavior of web buckling of Hexagonal Castellated Beams with Transverse Stiffeners Under Uniform Loads**. Proceedings of the 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation 2015. **Anais...** Em: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL ENGINEERING AND TRANSPORTATION. Guangzhou, China: Atlantis Press, 2015.

ELLOBODY, E. Nonlinear analysis of cellular steel beams under combined buckling modes. **Thin-Walled Structures**, v. 52, p. 66–79, mar. 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1 EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures**: Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1 EUROCODE 2: Design of concrete structures**: Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004b.

FANAIE, N.; PARTOVI, F.; SAFAEI FAEGH, S. Controlling the deflection of long beams using different patterns of pre-tensioning cables. **Scientia Iranica**, v. 28, n. 2, p. 598–617, 2021.

FEDOROFF, A.; CALONIUS, K. Using the Abaqus CDP model in impact simulations. **Rakenteiden Mekaniikka**, v. 53, n. 3, p. 180–207, 4 jul. 2020.

FERREIRA, A. C. **Vigas metálicas protendidas: análise estática, modal e de ruptura do cabo de protensão e aplicativo computacional para projetos**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

FRANS, R. et al. Numerical Modelling of Hexagonal Castellated Beam under Monotonic Loading. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 781–788, 2017.

GANDOMI, A. H. et al. A new prediction model for the load capacity of castellated steel beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 7, p. 1096–1105, 2011.

GAYKAR, V. M. **Prestressed Steel Beam**. Dissertação de Mestrado—Mumbai: Veermata Jijabai Technological Institute, 2013.

GIL, B.; GOÑI, R.; BAYO, E. Experimental and numerical validation of a new design for three-dimensional semi-rigid composite joints. **Engineering Structures**, v. 48, p. 55–69, mar. 2013.

GIZEJOWSKI, M. A.; SALAH, W. A. **Numerical Modeling of Composite Castellated Beams**. Composite Construction in Steel and Concrete VI. **Anais...** Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE CONSTRUCTION IN STEEL AND CONCRETE 2008. Devil's Thumb Ranch, Tabernash, Colorado, United States: American Society of Civil Engineers, 2011.

HADEED, S. M.; HUSSAIN ALSHIMMERI, A. J. Comparative Study of Structural Behaviour for Rolled and Castellated Steel Beams with Different Strengthening Techniques. **Civil Engineering Journal**, v. 5, n. 6, p. 1384–1394, 23 jun. 2019.

HADJIPANTELOS, N.; GARDNER, L.; WADEE, M. A. Finite-Element Modeling of Prestressed Cold-Formed Steel Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 145, n. 10, p. 04019100, 2019.

HAFEZOLGHORANI, M. et al. Simplified Damage Plasticity Model for Concrete. **Structural Engineering International**, v. 27, n. 1, p. 68–78, fev. 2017.

HAN, L.-H.; ZHAO, X.-L.; TAO, Z. Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns. **Steel and Composite Structures**, v. 1, n. 1, p. 51–74, 2001.

HARPER, C. S. Design in steel 4: Castellated & cellular beams. **British Steel Publications**, 1994.

HARTONO, W.; CHIEW, S. P. Composite Behaviour of Half Castellated Beam with Concrete Top Slab. Em: **Advances in Steel Structures (ICASS '96)**. [s.l.] Elsevier, 1996. p. 437–442.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 3<sup>a</sup> ed. [s.l.] Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 6, p. 773–781, nov. 1976.

JANKOWIAK, T.; LODYGOWSKI, T. Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. **Foundations of Civil and Environmental Engineering**, v. 6, 2005.

JARDIM, P. I. L. G. et al. Análise estrutural de viga de aço em fase executiva da aplicação de protensão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, n. 1, p. 9, 2021.

JIA, L.-G. et al. Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Castellated Beam with Hexagonal Holes. **Experimental Study and Theoretical Analysis on Seismic Performance of Castellated Beam with Hexagonal Holes**, v. 16, n. 3, p. 233–245, 2020.

JIA, Y. M.; LIANG, D. W. Numerical Analysis of Prestressed Steel Box Beams. **Advanced Materials Research**, v. 163–167, p. 862–865, 2011.

KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. Failure modes for castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 4, n. 4, p. 295–315, jan. 1984.

KOEBERL, B.; WILLAM, K. Question of Tension Softening versus Tension Stiffening in Plain and Reinforced Concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 134, n. 9, p. 804–808, set. 2008.

KOPÁLOVÁ, M.; PRIBRAMSKY, V. Numerical Analysis of Prestressed UHPC Lightened Member. **Solid State Phenomena**, v. 272, p. 172–177, 2018.

KOSTIC, S. M.; DERETIC-STOJANOVIC, B. Bending Resistance of Composite Sections with Nonductile Shear Connectors and Partial Shear Connection. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1–14, 2018.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. Dissertação de Mestrado—São Carlos: Universidade de São Paulo, 2006.

LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 124, n. 8, p. 892–900, ago. 1998.

LEE, S.-H. et al. ABAQUS modeling for post-tensioned reinforced concrete beams. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101273, jul. 2020.

LIU, H. B. et al. Prestress Force Effect on Natural Frequencies of Simply Supported Beams. **Applied Mechanics and Materials**, v. 275–277, p. 1172–1175, jan. 2013.

LORENC, W.; KUBICA, E. Behavior of composite beams prestressed with external tendons: Experimental study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 12, p. 1353–1366, 2006.

LUBLINER, J. et al. A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

MAHDI, S. et al. Various types of shear connectors in composite structures: A review. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 7, n. 22, p. 2876–2890, 2012.

MAIA, K. A. F. P. **Modelo numérico de viga mista de aço e concreto composta por perfil formado à frio e conectores do tipo parafusos com rebite**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. **AEDEM International Conference**, 2017.

MESQUITA, L. C. et al. **Aspectos relevantes sobre a modelagem computacional de vigas mistas de aço e concreto**. Anais do SIMMEC 2016. **Anais...** Em: XII SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL. Diamantina, Brasil: 2016.

MIRZA, O.; UY, B. Effects of strain regimes on the behaviour of headed stud shear connectors for composite steel-concrete beams. **Advanced Steel Construction**, v. 6, n. 1, p. 635–661, 2010.

MOHEBKHAH, A. The moment-gradient factor in lateral–torsional buckling on inelastic castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 60, n. 10, p. 1481–1494, 2004.

MOHEBKHAH, A.; AZANDARIANI, M. G. Shear resistance of retrofitted castellated link beams: Numerical and limit analysis approaches. **Engineering Structures**, v. 203, p. 109864, jan. 2020.

MONTEIRO, R. A. **Estratégias de modelagem de vigas mistas via ABAQUS®**. Monografia de Projeto Final—João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2021.

NELSEN, A. C. H. **Comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto com protensão externa**. Dissertação de Mestrado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2013.

NELSEN, A. C. H.; SOUZA, A. S. C. DE. **Vigas mistas de aço e concreto com protensão externa: conceitos e aplicações**. ConstruMetal 2012. **Anais...** Em: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA. 2012.

NIE, J. G. et al. Experimental and Analytical Study of Prestressed Steel–Concrete Composite Beams Considering Slip Effect. **Journal of Structural Engineering**, v. 133, n. 4, p. 530–540, abr. 2007.

OUKAILI, N. K.; ABDULLAH, S. S. **Behavior of composite concrete-cellular steel beams under combined flexure and torsion**. . Em: SMAR 2017 – FOURTH CONFERENCE ON SMART MONITORING ASSESSMENT AND REHABILITATION OF CIVIL STRUCTURES. Zürich: 2017.

OUKAILI, N. K.; ABDULLAH, S. S. Strengthening Aspects to Improve Serviceability of Open Web Expanded Steel-Concrete Composite Beams in Combined Bending and Torsion. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 433, p. 012041, 2018.

OZTURK, H.; DEMIR, A.; CAGLAR, N. **Effect of Support Conditions on Behavior of Reinforced Concrete Short Beams**. . Em: 12TH INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING. Istanbul, Turkey: 2016.

PACHPOR, P. D. et al. Parametric Study of Castellated Beam. **Advanced Materials Research**, v. 163–167, p. 842–845, 2011a.

PACHPOR, P. D. et al. Finite Element Analysis and Comparison of Castellated and Cellular Beam. **Advanced Materials Research**, v. 264–265, p. 694–699, 2011b.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. 8. ed. [s.l.] LTC, 2009.

PONNADA, M. R.; VIPPARATHY, R. Computerized Optimum Dimensioning of Prestressed Homogenous Steel I-Beam. **Engineering Journal**, v. 21, n. 7, p. 293–318, 2017.

PONSORN, P.; PHUVORAVAN, K. Efficiency of Castellated and Cellular Beam Utilization Based on Design Guidelines. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 25, n. 3, p. 04020016, 2020.

PRAKASH, A. et al. Three Dimensional FE Model of Stud Connected Steel-Concrete Composite Girders Subjected to Monotonic Loading. **International Journal of Mechanics and Applications**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2011.

REN, W. et al. Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 1, p. 45–54, 2015.

RIBEIRO, K. D. et al. Behavior of composite beams with external prestressing in sagging moment regions. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 4, p. e14405, 2021.



RIBEIRO, M. C. DOS R. **Análise numérica e experimental de vigas metálicas submetidas a protensão externa**. Dissertação de Mestrado—Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

ROSSI, A. et al. Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 106192, set. 2020.

SEOW, P. E. C.; SWADDIWUDHIPONG, S. Failure Surface for Concrete under Multiaxial Load—a Unified Approach. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 17, n. 2, p. 219–228, abr. 2005.

SILVA, E. N. DA. **Modelagem numérica do comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto protendidas**. Dissertação de Mestrado—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2018.

SILVA, H. P. D. **Simulação numérica do comportamento de conectores de cisalhamento tipo crestbond**. Dissertação de Mestrado—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SILVEIRA, E. G. DA. **Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação**. Dissertação de Mestrado—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011.

SUN, Q. et al. Effect of longitudinal reinforcement and prestressing on stiffness of composite beams under hogging moments. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 100, p. 1–11, set. 2014.

SZCZECINA, M.; TWORZEWSKI, P.; BACHARZ, K. Experimental verification of a numerical model of RC beam with CFRP rope strengthening. **Computer Assisted Methods in Engineering and Science**, v. 26, p. 137–151, 2019.

SZCZECINA, M.; WINNICKI, A. **Numerical simulations of corners in RC frames using strut-and-tie method and CDP model**. . Em: XIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL PLASTICITY. FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. COMPLAS XIII, 2015.

SZCZECINA, M.; WINNICKI, A. Selected Aspects of Computer Modeling of Reinforced Concrete Structures. **Archives of Civil Engineering**, v. 62, n. 1, p. 51–64, 1 mar. 2016.

TAMAYO, J. L. P. et al. Some Aspects of Numerical Modeling of Steel-Concrete Composite Beams with Prestressed Tendons. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 7, p. e219, 2019.

TAN, E. L.; UY, B. Nonlinear analysis of composite beams subjected to combined flexure and torsion. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 5, p. 790–799, 2011.

TAO, Z.; WANG, Z.-B.; YU, Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 89, p. 121–131, out. 2013.

TAWFIK, A. B.; MAHFOUZ, S. Y.; TAHER, S. E.-D. F. Nonlinear ABAQUS Simulations for Notched Concrete Beams. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7349, 30 nov. 2021.

THOMAS, A. C.; BASKAR, K. Strengthening of thin-webbed castellated beam using CFRP. **International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics**, v. 19, n. 6, p. 396–404, 2018.

TOKUNAGA, H. R. **Metodologia prática para determinação de cablagem em vigas de pontes isostáticas**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2020.

TROITSKY, M. S. **Prestressed steel bridges: theory and design**. 16. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

UY, B.; CRAINE, S. Static Flexural Behaviour of Externally Post-Tensioned Steel-Concrete Composite Beams. **Advances in Structural Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1–20, 2004.

VERÍSSIMO, G. DE S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo de seu comportamento**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WALKER, P. A. **METHOD OF MAKING CASTELLATED BEAMS**. Halifax, 23 jan. 1990.

WANG, C. Q.; ZHU, Y. F.; SHEN, Y. G. Finite Element Analysis of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beam. **Applied Mechanics and Materials**, v. 433–435, p. 2302–2308, out. 2013.

WANG, P. et al. Shear buckling strengths of web-posts in a castellated steel beam with hexagonal web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 121, p. 173–184, 2016.

WANG, P.; WANG, X.; MA, N. Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings. **Engineering Structures**, v. 75, p. 315–326, set. 2014.

WANG, T. et al. Mechanical Performance of Simple Supported Concrete Beam-Cable Composite Element with External Prestress. Em: YALCINER, H.; NOROOZINEJAD FARSANGI, E. (Eds.). **New Trends in Structural Engineering**. [s.l.] IntechOpen, 2018.

WIJESIRI PATHIRANA, S. et al. Flexural behaviour of composite steel–concrete beams utilising blind bolt shear connectors. **Engineering Structures**, v. 114, p. 181–194, maio 2016.

XING, Y. et al. Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 123, p. 79–92, 2016.

XU, J.; SUN, X. Nonlinear finite element parametric analysis of prestressed steel reinforced concrete beams. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 439, p. 042050, 5 nov. 2018.

YAPAR, O.; BASU, P. K.; NORDENDALE, N. Accurate finite element modeling of pretensioned prestressed concrete beams. **Engineering Structures**, v. 101, p. 163–178, out. 2015.

ZHOU, H. et al. Fire tests on composite steel-concrete beams prestressed with external tendons. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 143, p. 62–71, abr. 2018.

ZUHAIRI, A. H. A. A.-; MANSI, A. I. **Behavior of Composite Concrete-Castellated Steel Beams in Flexure**. . Em: 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT TRENDS OF ENGINEERING SCIENCES SUSTAINABILITY. 2017.