

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INSTABILIDADE NO MONTANTE DA  
ALMA EM VIGAS MISTAS CELULARES COM AÇO E  
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

MARINGÁ  
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INSTABILIDADE NO MONTANTE DA  
ALMA EM VIGAS MISTAS CELULARES COM AÇO E  
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Área de concentração Estruturas e Geotecnia.

Discente: Jonas Yoshihiro Namba

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl

MARINGÁ  
2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

N174a

Namba, Jonas Yoshihiro

Análise numérica da instabilidade no montante da alma em vigas mistas celulares com aço e concreto de alta resistência / Jonas Yoshihiro Namba. -- Maringá, PR, 2025. 214 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rossi.

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Vigas mistas celulares. 2. Simulação Numérica. 3. Vigas de aço. 4. Concreto de alta resistência. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. Rossi, Alexandre, coorient. III. Krahl, Pablo Augusto, coorient. IV. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. V. Título.

CDD 23.ed. 624.183

JONAS YOSHIHIRO NAMBA

## ANÁLISE NUMÉRICA DA INSTABILIDADE NO MONTANTE DA ALMA EM VIGAS MISTAS CELULARES COM AÇO E CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 13/02/2025, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

### BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

**CARLOS HUMBERTO MARTINS**

Data: 15/02/2025 09:36:58-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Carlos Humberto Martins**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Professor Orientador



Documento assinado digitalmente

**ALEXANDRE ROSSI**

Data: 15/02/2025 09:47:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Alexandre Rossi**  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Professor Coorientador



Documento assinado digitalmente

**PABLO AUGUSTO KRAHL**

Data: 17/02/2025 09:19:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Pablo Augusto Krahl**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá  
Professor Coorientador



Documento assinado digitalmente

**ELYSON ANDREW POZO LIBERATI**

Data: 17/02/2025 09:47:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Elyson Andrew Pozo Liberati**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Estadual de Maringá



Documento assinado digitalmente

**CARLOS ALBERTO BENEDETTY TORRES**

Data: 17/02/2025 12:35:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Carlos Alberto Benedetty Torres**  
Universidad de Ingeniería y Tecnología  
Lima, Peru

*Aos meus Pais, Davi e Martinha, a minha namorada, Vitória,  
e aos meus irmãos Jhonathan, Jaqueline e Luma.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida e pelo caminho que Ele me guiou até aqui. Foi Ele quem permitiu que cada desafio fosse superado, que cada dia de trabalho fosse vencido e, acima de tudo, colocou ao meu lado pessoas que me apoiaram e tornaram essa jornada possível.

Agradeço aos meus pais, Davi e Martinha, que são a base e a razão de cada conquista. Pai e mãe, cada dia de trabalho, cada esforço, cada investimento na minha educação, valeu a pena. Cada oração, cada apoio incondicional e tudo o que fizeram por mim foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Sou imensamente grato por terem acreditado em mim em todos os momentos. Eu amo vocês e sou grato por tudo.

Agradeço ao meu irmão Jhonathan, cuja trajetória profissional sempre me inspirou e influenciou de forma positiva, guiando-me por um caminho sólido e promissor. E como não agradecer a você, minha irmãzinha Jaqueline, que sempre encontrou uma forma de adoçar meus dias com seu carinho e suas deliciosas sobremesas. Saiba que estarei sempre aqui por você.

Agradeço à minha namorada, Vitória, que foi meu suporte e porto seguro em tantos momentos. Você me encorajou quando pensei em desistir, me trouxe calma nos momentos de angústia e cuidou de mim quando o desânimo tentou me alcançar. Sou imensamente grato por todo o amor, paciência e apoio. Agradeço a família Vilela, que me adotaram como filho, vocês são parte da minha família. Obrigado por sempre estarem na torcida pelas minhas conquistas.

Agradeço a todos os amigos que fiz no mestrado, de maneira especial, expresse minha gratidão ao Haron e ao Igor, que estiveram ao meu lado desde a graduação, seguiram comigo nesta jornada e, sem dúvida, continuarão fazendo parte do meu futuro. Vocês tornaram o dia a dia mais leve e foram essenciais em diversas etapas desta pesquisa. Muito obrigado!

Agradeço aos meus amigos da graduação, do ensino médio e do grupo de oração, que, mesmo com a correria, seguem sendo parte essencial da minha vida. Sou especialmente grato aos meus casais de amigos Vinicius e Geovana, Fernando e Rafaela que sempre me inspiram e estão ao meu lado. O apoio de vocês, tanto nas dificuldades quanto na fé, é algo que levarei para sempre.

Agradeço imensamente aos meus amigos e professores Carlos Humberto Martins, Alexandre Rossi e Pablo Augusto Krahl, cuja dedicação e disponibilidade foram

essenciais ao longo desta jornada, sempre oferecendo orientação e apoio com excelência. Sou grato por todo o conhecimento compartilhado e pela inspiração que representam. Também estendo meu agradecimento ao professor Vladimir José Ferrari, pelo suporte inicial na estruturação deste trabalho.

Agradeço aos professores e técnicos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, que ofereceram, dentro de suas possibilidades, as melhores condições para o desenvolvimento deste trabalho. Sou igualmente grato ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), fundamentais para a realização desta pesquisa.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento e para a concretização deste trabalho. Caso eu tenha deixado de mencionar alguém, peço desculpas.

*“Buscai em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça e todas estas coisas  
vos serão dadas em acréscimo.” (Mateus 6, 33)*

## RESUMO

As vigas mistas celulares são amplamente utilizadas em estruturas devido à sua eficiência na redução de peso e aumento da capacidade resistente. No entanto, seu comportamento estrutural, quando compostas por materiais de alta resistência, ainda é pouco investigado. Diante disso, este estudo realizou uma análise numérica em vigas mistas de aço e concreto de alta resistência, nas quais o concreto teve uma substituição parcial de agregados convencionais por resíduos de louça sanitária. Esse concreto foi caracterizado experimentalmente para garantir a precisão dos modelos numéricos e a representatividade do comportamento mecânico. Para avaliar o impacto dos parâmetros geométricos e materiais no comportamento estrutural, foram conduzidas duas análises paramétricas no software ABAQUS®. No primeiro conjunto, foram desenvolvidos 360 modelos numéricos, variando o tamanho e o espaçamento das aberturas, o comprimento das vigas e a geometria da seção transversal. Na segunda paramétrica, 120 modelos foram analisados para investigar a influência das propriedades do material, incluindo diferentes resistências do aço e do concreto, além da posição dos enrijecedores e da espessura da alma. Os resultados mostraram que o uso de materiais de alta resistência altera significativamente os modos de falha e o desempenho estrutural das vigas. A geometria das aberturas influencia diretamente a distribuição de tensões, impactando a resistência e os mecanismos de falha. A comparação entre as simulações numéricas e as abordagens normativas revelou que alguns modelos teóricos são conservadores, enquanto outros oferecem previsões mais precisas para determinados cenários estruturais.

**Palavras-Chaves:** Vigas celulares mistas de aço e concreto de alta resistência; Instabilidade no montante da alma; Momento positivo; Concreto com agregado reciclado.

## **ABSTRACT**

Cellular composite beams are widely used in structural systems due to their efficiency in reducing self-weight and enhancing load-bearing capacity. However, their structural behavior when composed of high-strength materials remains insufficiently explored.

In this context, the present study performed a numerical analysis of composite beams made of high-strength steel and concrete, in which 50% of the fine aggregate was replaced with recycled ceramic waste from sanitary ware. This concrete was experimentally characterized to ensure the accuracy of the numerical models and the representativeness of its mechanical behavior. To assess the influence of geometric and material parameters on the structural response, two parametric studies were conducted using the ABAQUS® software. In the first set, 360 numerical models were developed, varying the size and spacing of the web openings, beam length, and cross-sectional geometry. In the second parametric study, 120 models were analyzed to investigate the influence of material properties, including different steel and concrete strengths, as well as the position of stiffeners and web thickness. The results showed that the use of high-strength materials significantly alters the failure modes and structural performance of the beams. The geometry of the openings directly influences the stress distribution, affecting both the ultimate capacity and the failure mechanisms. The comparison between numerical simulations and design code approaches revealed that while some analytical models are conservative, others provide more accurate predictions for specific structural configurations.

**Keywords:** Composite cellular beams of high-strength steel and concrete; Web-Post Buckling; Positive moment; Concrete with recycled aggregate.

# LISTA DE SÍMBOLOS

<i>AAR</i>	Aço de alta resistência
$b_c$	Largura da laje de concreto
$b_f$	Largura das mesas
$b_p$	Largura da região crítica
$b_w$	Largura do montante da alma intermediário
$b_{we}$	Largura do montante de extremidade
<i>CAA</i>	Concreto Autoadensável
$C(i)$	Compressão no tê superior
$C(i+1)$	Compressão no tê inferior
$C1$	Propriedade geométrica do montante de alma
$C2$	Propriedade geométrica do montante de alma
$C3$	Propriedade geométrica do montante de alma
$C1$ e $C2$	Constantes do modelo de Hordijk (1992)– 3,00 e 6,93 respectivamente
<i>CDP</i>	<i>Concrete Damage Plasticity</i>
<i>CRF</i>	Concreto Reforçado com Fibras
$d$	Altura da seção transversal do perfil original
<i>DA</i>	Distorção da Alma
$d_{ef,comp}$	Altura efetiva de compressão
$D_0$	Diâmetro das aberturas
$d_c$	Dano a compressão
$d_f$	Diâmetro da fibra
$d_g$	Altura da seção transversal do perfil celular
$E$	Módulo de Elasticidade
$E_i$	Módulo de elasticidade inicial
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$f_{cr,w}$	Cisalhamento crítico no montante da alma
$f_c'$	Tensão máxima do concreto a compressão
$f_{bd}/f_c$	Relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão
$f_{cm}$	Resistência média a compressão do concreto
<i>FLT</i>	Instabilidade Lateral com torção

$FMA$	Instabilidade no montante da alma
$f_t$	Resistência da matriz à tração
$f_{tm}$	Resistência média a tração
$f_y$	Tensão de escoamento
$G_f$	Energia de fratura
$K_c$	Fator de forma
$L$	Comprimento
$L_E$	Comprimento embebido inicial
$l_{ef}$	Comprimento efetivo do montante de alma
$L_f/d_f$	Razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra
$L_f$	Comprimento da fibra
$MV$	Mecanismo de Vierendeel
$M_{w,e}$	Momento de Equilíbrio
$M_{w,Rk}$	Momento de resistência à instabilidade no montante de alma
$p$	Passo entre alvéolos
$P_{eq}$	Carga de arrancamento
$P_{Máx}$	Força máxima de arrancamento
$RNA$	Redes Neurais Artificiais
$t_{500}$	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 500 mm
$t_f$	Espessura das mesas
$t$	Espessura da alma
$UHPC$	Concreto de ultra alto desempenho
$UNEP IRP$	<i>United Nations Environment Programme International Resource Panel</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – Painel Internacional de Recursos)
$V_h$	Cortante horizontal
$V_f$	Volume de fibras
$V_{Gh,Rk}$	Resistência a cortante
$V_{h,p}$	Cortante de Plastificação
$V_{wh,Rk}$	Força cortante horizontal de Ward (1990)
$w$	Abertura (fissura)
$w_0$	Abertura de pico
$w_c$	Abertura crítica
$W_p$	Energia de arrancamento

$y_b$	Distância vertical do centroide até o tê inferior
$y_p$	Distância do centroide até a região crítica
$y_t$	Distância vertical do centroide até o tê superior
$\beta$	Parâmetro do material que depende do formato do diagrama
$\epsilon$	Excentricidade
$\epsilon$	deformação do concreto
$\epsilon_c'$	deformação correspondente a tensão máxima $f_c'$
$\epsilon_c$	Deformação a compressão
$\epsilon_t$	Deformação a tração
$H$	Coefficiente de orientação das fibras
$\bar{\lambda}$	Fator de esbeltez reduzida
$\lambda_{ma,0}$	Fator de esbeltez
$\lambda_w$	Fator de esbeltez do montante de alma
$\mu$	Viscosidade
$\sigma_{c,máx}$	Tensão a compressão máxima
$\sigma_{f,máx}$	Tensão máxima da fibra
$\sigma_{Rk}$	Tensão Lawson e Hicks (2011)
$\sigma_c$	Tensão de compressão
$\sigma_{f0}$	Maior resistência da fibra
$\sigma_m$	Resistência da matriz (amolecimento)
$\sigma_p$	Tensão de proporcionalidade
$\sigma_r$	Tensão residual
$\sigma_{res,web}$	Tensão resistente da alma
$\sigma_t$	Tensão de tração
$\tau_{av}$	Resistência de aderência média
$\tau_{eq}$	Tensão de aderência das fibras na matriz
$\psi$	Ângulo de dilatação
$\chi$	Fator de redução

# LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Viga mista de perfil metálico I com laje maciça. ....	22
<b>Figura 1.2:</b> Corte das Vigas celulares .....	23
<b>Figura 1.3:</b> Fluxograma da metodologia sintetizada .....	27
<b>Figura 2.1:</b> Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas. ....	30
<b>Figura 2.2:</b> Aberturas alveolares em Perfis I.....	30
<b>Figura 2.3:</b> Esquema do corte dos semicírculos do Perfil I.....	31
<b>Figura 2.4:</b> Corte dos semicírculos do Perfil I .....	31
<b>Figura 2.5:</b> Utilização de vigas alveolares .....	32
<b>Figura 2.6:</b> a) Perfil I Celular com laje Maciça; b) Componentes da Viga mista .....	32
<b>Figura 2.7:</b> Mecanismo Vierendeel .....	33
<b>Figura 2.8:</b> Instabilidade no montante da alma por cisalhamento.....	34
<b>Figura 2.9:</b> Instabilidade Lateral com torção .....	34
<b>Figura 2.10:</b> Distorção da alma .....	35
<b>Figura 2.11:</b> Comportamento das instabilidades no ensaio com ausência da laje mista na seção final.....	36
<b>Figura 2.12:</b> Comportamento das instabilidades em aberturas alongadas .....	37
<b>Figura 2.13:</b> Comportamento das instabilidades no ensaio de perfis assimétricos .....	38
<b>Figura 2.14:</b> Mecanismo de Vierendeel desenvolvido na abertura alongada.....	39
<b>Figura 2.15:</b> FMA desenvolvidas nos perfis celulares .....	40
<b>Figura 2.16:</b> Comportamento das estruturas de vigas mistas submetidas a flexão .....	42
<b>Figura 2.17:</b> Carga x Deslocamento.....	43
<b>Figura 2.18:</b> Elementos de malha.....	46
<b>Figura 3.1:</b> Modelo analítico de Lawson et al. (2006) .....	52
<b>Figura 3.2:</b> Modelo analítico de Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014).....	53
<b>Figura 4.1:</b> Peneiramento do Agregado reciclado.....	58
<b>Figura 4.2:</b> Curvas granulométricas: materiais finos e agregado graúdo.....	59
<b>Figura 4.3:</b> a) areia fina; b) agregado reciclado .....	59
<b>Figura 4.4:</b> Fluxograma dos materiais adicionados na concretagem .....	61
<b>Figura 4.5:</b> Cone de Abrams .....	61
<b>Figura 4.6:</b> Classes do IEV.....	62
<b>Figura 5.1:</b> Tipos de elementos finitos e tamanhos das malhas .....	66

<b>Figura 5.2:</b> Contato entre os elementos.....	67
<b>Figura 5.3:</b> Modelos constitutivos do aço .....	67
<b>Figura 5.4:</b> Carreira & Chu (1995) para concreto submetido a compressão.....	68
<b>Figura 5.5:</b> Modelo de Hordijk na tração .....	69
<b>Figura 5.6:</b> Comportamento do compósito reforçado com fibras .....	70
<b>Figura 5.7:</b> Condições de contorno .....	71
<b>Figura 5.8:</b> Cisalhamento horizontal AISC Steel Design Guide 31 (SD31).....	71
<b>Figura 5.9:</b> “ <i>Integrated Output Section</i> ” método para obter a cortante horizontal ( $V_H$ ) .....	72
<b>Figura 5.10:</b> Geometria do modelo M1 (dimensões em mm) .....	74
<b>Figura 5.11:</b> Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M1 .....	74
<b>Figura 5.12:</b> Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M1.....	75
<b>Figura 5.13:</b> Geometria do modelo M2 (dimensões em mm) .....	76
<b>Figura 5.14:</b> Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M2 .....	77
<b>Figura 5.15:</b> Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M2.....	77
<b>Figura 5.16:</b> Geometria do modelo M3 (dimensões em mm) .....	78
<b>Figura 5.17:</b> Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M3 .....	79
<b>Figura 5.18:</b> Danos por compressão (A1, A2 e A3), tensões nos conectores (B) e comparação entre falhas experimental e numérica (C) do modelo M3.....	79
<b>Figura 5.19:</b> Geometria do modelo M4 e M5 (dimensões em mm).....	80
<b>Figura 5.20:</b> Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M4 .....	81
<b>Figura 5.21:</b> Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M4.....	81
<b>Figura 5.22:</b> Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M5 .....	82
<b>Figura 5.23:</b> Danos por compressão (A), tensões nos conectores (B) e comparação entre falhas experimental e numérica (C) do modelo M5 .....	83
<b>Figura 6.1:</b> Parâmetros analisados.....	86

<b>Figura 6.2:</b> Configuração da seção geométrica .....	86
<b>Figura 6.3:</b> Parâmetros analisados.....	87
<b>Figura 7.1:</b> Concreto no ensaio Slump Flow; a) $t_{500}$ do concreto; b) Diâmetro do concreto final SF .....	89
<b>Figura 7.2:</b> a) Compressão axial; b) Módulo de elasticidade; c) Compressão diametral .....	89
<b>Figura 7.3:</b> Teste de Sensibilidade da imperfeição geométrica inicial.....	90
<b>Figura 7.4:</b> FMA desenvolvido nas vigas mistas celulares .....	91
<b>Figura 7.5:</b> VM desenvolvido nas vigas mistas celulares .....	91
<b>Figura 7.6:</b> FMA + VM desenvolvido nas vigas mistas .....	92
<b>Figura 7.7:</b> Compressão nas lajes de concreto dos modelos paramétricos .....	92
<b>Figura 7.8:</b> Tração nas lajes de concreto dos modelos paramétricos .....	92
<b>Figura 7.9:</b> Influência das aberturas na resistência do elemento.....	94
<b>Figura 7.10:</b> Perfis W310x52 com diferentes relações $D_o/d$ , $P/D_o = 1.3$ e $L = 4.0m$ ..	95
<b>Figura 7.11:</b> Influência do espaçamento das aberturas na resistência do elemento .....	96
<b>Figura 7.12:</b> Perfis W360x57,8 com diferentes relações $P/D_o$ e $D_o/d = 0,8$ $L = 5,0m$ ..	97
<b>Figura 7.13:</b> Influência do comprimento das vigas mistas na resistência do elemento ..	98
<b>Figura 7.14:</b> Perfis W310x44,5 com diferentes comprimentos e $D_o/d = 0.8$ $P/D_o = 1.2$ .....	99
<b>Figura 7.15:</b> Perfis W310x44,5 com diferentes comprimentos e $D_o/d = 0,8$ $P/D_o = 1,3$ .....	99
<b>Figura 7.16:</b> Corte dos perfis com diferentes espessuras .....	100
<b>Figura 7.17:</b> Influência da espessura em viga mistas .....	101
<b>Figura 7.18:</b> Comparação entre os modelos numéricos e os manuais SCI P355 e o Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014).....	103
<b>Figura 7.19:</b> Erros Relativos .....	104
<b>Figura 7.20:</b> Comparação entre o modelo numérico obtidos pelo SD31, e os modelos de Ward, Grilo e a Eurocode.....	105
<b>Figura 7.21:</b> Comparação entre o modelo numérico obtidos pelo SOF3, e os modelos de Ward, Grilo e a Eurocode.....	106
<b>Figura 7.22:</b> Erro Relativo.....	108
<b>Figura 7.23:</b> Modelo de Falha apresentado .....	109
<b>Figura 7.24:</b> Comportamento do aço para a resistência última nos modelos $t_w = 6,4mm$ e 2 enrijecedores.....	111

<b>Figura 7.25:</b> Comportamento do concreto para a resistência última nos modelos com $t_w = 6,4\text{mm}$ e 2 enrijecedores.....	112
<b>Figura 7.26:</b> Dano a compressão no concreto – S690, $t_w = 6,4\text{mm}$ e 2 enrijecedores..	113
<b>Figura 7.27:</b> Tensão nos conectores – S690, $t_w = 6,4\text{mm}$ e 2 enrijecedores.....	113
<b>Figura 7.28:</b> Carga última - modelo C45 com 2 enrijecedores .....	114
<b>Figura 7.29:</b> Diferença da resistência modelo C80 – S690 – $t_w = 8.6\text{mm}$ .....	115
<b>Figura 7.30:</b> Comparação entre os modelos numéricos e os manuais SCI P355 e o Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014).....	116
<b>Figura 7.31:</b> Erro relativo do modelo da SCI P355 - (2S) .....	116
<b>Figura 7.32:</b> Erro relativo do modelo do Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014) .....	117
<b>Figura 7.33:</b> Comparação entre os modelos numéricos e os resultados obtidos por Ward (1990), Grilo et al. (2018), e a BS EN 1993-1-13(2024) – SD31 .....	117
<b>Figura 7.34:</b> Comparação entre os modelos numéricos e os resultados obtidos por Ward (1990), Grilo et al. (2018), e a BS EN 1993-1-13(2024) – SOF3 .....	118
<b>Figura 7.35:</b> Erro relativo do modelo de Ward (1990) – SOF3 .....	119
<b>Figura 7.36:</b> Erro relativo do modelo de Grilo <i>et al.</i> (2018) – SOF3.....	119
<b>Figura 7.37:</b> Erro relativo do modelo de BS EN 1993-1-13(2024) – SOF3 .....	120

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Malhas usadas na literatura em vigas mistas .....	47
<b>Tabela 2.2:</b> Parâmetros do CDP na literatura .....	49
<b>Tabela 3.1:</b> Valores de m, n, o, p e q para o modelo de Grilo et al. (2018) .....	55
<b>Tabela 4.1:</b> Composição química do agregado reciclado .....	60
<b>Tabela 4.2:</b> Proporção do concreto estudado.....	60
<b>Tabela 4.3:</b> Classes para os resultados do ensaio do Slump Flow .....	62
<b>Tabela 5.1:</b> Deformação última a partir da resistência última a compressão .....	68
<b>Tabela 5.2:</b> Modelos validados.....	73
<b>Tabela 5.3:</b> Comparação das carga últimas .....	83
<b>Tabela 6.1:</b> Geometria das seções .....	85
<b>Tabela 6.2:</b> Propriedades dos materiais utilizados .....	86
<b>Tabela 6.3:</b> Referências para os parâmetros utilizados nos aços.....	87
<b>Tabela 7.1:</b> Comparação entre as cargas últimas.....	90

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	PROBLEMÁTICA .....	22
1.2	JUSTIFICATIVA .....	24
1.3	OBJETIVOS .....	25
1.4	SÍNTESE DA METODOLOGIA .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>28</b>
2.1	VIGAS MISTAS ALVEOLARES .....	29
2.1.1	Conceito .....	29
2.1.2	Desenvolvimento e processo de fabricação de vigas mistas celulares .....	31
2.1.3	Modos de falha .....	32
2.1.3.1	Mecanismo de Vierendeel .....	33
2.1.3.2	Instabilidade no montante da alma .....	33
2.1.3.3	Instabilidade lateral com torção .....	34
2.1.3.4	Distorção da alma .....	35
2.1.4	Resultados e avanços em pesquisas precedentes .....	35
2.1.4.1	Influência da laje de concreto .....	35
2.1.4.2	Influência da geometria do perfil .....	36
2.1.4.3	Perfis assimétricos .....	38
2.1.4.4	Investigação dos modos de falha em vigas mistas celulares .....	39
2.2	AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA (AAR) E CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) .....	40
2.3	CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO .....	42
2.3.1	Agregado reciclado de construção .....	43
2.3.2	Agregado reciclado de resíduos de cerâmica sanitária .....	44
2.4	MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS .....	46
2.4.1	Malha de elementos finitos .....	46
2.4.2	Tensões Residuais .....	47
2.4.3	Imperfeição Geométrica Inicial .....	47
2.4.4	<i>Concrete Damage Plasticity</i> (CDP) .....	48
<b>3</b>	<b>MANUAIS E NORMAS PARA AVALIAÇÃO DA FMA</b> .....	<b>50</b>
3.1	WARD (1990) .....	51
3.2	LAWSON <i>et al.</i> (2006) E LAWSON E HICKS (2011) – SCI P355 .....	52

3.3	PANEDPOJAMAN, THEPCHATRI e LIMKATANYU (2014) .....	53
3.4	GRILO <i>et al.</i> (2018) .....	54
3.5	<i>EUROCODE 3 – Part 1-13: Beams with large web opening</i> .....	55
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....</b>	<b>57</b>
4.1	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	58
4.2	MISTURA E LANÇAMENTO.....	60
4.3	ESTADO FRESCO DO CONCRETO .....	61
4.4	ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO.....	63
<b>5</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA .....</b>	<b>64</b>
5.1	O MODELO NUMÉRICO.....	65
5.1.1	Geometria, elemento finito e malha .....	65
5.1.2	Interação entre os materiais .....	66
5.1.3	Modelos Constitutivos.....	67
5.1.4	Condições de contorno .....	70
5.2	FORÇA CORTANTE HORIZONTAL DO ELEMENTO FINITO .....	71
5.2.1	<i>AISC Steel Design Guide 31 (SD31)</i> .....	71
5.2.2	Dados diretamente do ABAQUS.....	72
5.3	VALIDAÇÃO NUMÉRICA .....	73
5.3.1	Modelos M1 e M2 (NADJAI <i>et al.</i> , 2007 e VASSART, 2009) .....	74
5.3.2	Modelo M3 (Tong <i>et al.</i> , 2022) .....	78
5.3.3	Modelo M4 e M5 (MÜLLER <i>et al.</i> , 2006).....	80
<b>6</b>	<b>ESTUDO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>84</b>
6.1	INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA.....	85
6.2	INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS .....	87
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>88</b>
7.1	CONCRETO.....	89
7.1.1	Estado Fresco.....	89
7.1.2	Estado Endurecido.....	89
7.2	ESTUDO DE SENSIBILIDADE .....	90
7.3	ANÁLISE PARAMÉTRICA I.....	91
7.3.1	Influência dos parâmetros na resistência das vigas mistas celulares.....	93
7.3.1.1	Influência do tamanho da abertura ( $D_o/d$ ) .....	93
7.3.1.2	Influência do espaçamento entre aberturas ( $P/D_o$ ) .....	95
7.3.1.3	Influência do comprimento (L).....	97
7.3.1.4	Influência da seção transversal .....	100
7.3.2	Comparação normativa com os resultados numéricos .....	102

7.3.2.1	Abordagem da Cortante Global ( $V$ ).....	102
7.3.2.2	Abordagem da Cortante Horizontal ( $V_h$ ).....	104
7.4	ANÁLISE PARAMÉTRICA II.....	109
7.4.1	Influência das propriedades mecânicas dos materiais, espessura da alma e enrijecedores no desempenho das vigas mistas celulares .....	109
7.4.1.1	Aço .....	110
7.4.1.2	Concreto .....	111
7.4.1.3	Espessura da alma.....	113
7.4.1.4	Enrijecedores .....	114
7.4.2	Comparação normativa com os resultados numéricos .....	115
7.4.2.1	Abordagem da cortante Global ( $V$ ).....	115
7.4.2.2	Abordagem da Cortante Horizontal ( $V_h$ ) .....	117
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>121</b>
8.1	CONCLUSÃO.....	122
8.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>138</b>
	APÊNDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I) .....	139
	APÊNDICE B: Gráficos da carga crítica (Paramétrica I).....	170
	APÊNDICE C: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica I) .....	172
	APÊNDICE D: Modos de falha e carga crítica .....	202
	APÊNDICE E: Gráficos da carga crítica (Paramétrica II) .....	206
	APÊNDICE F: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica II) .....	207

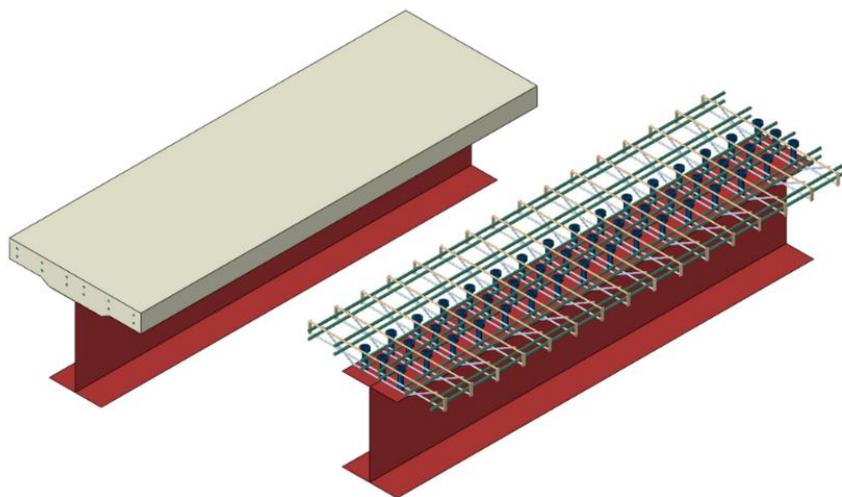
# **1 INTRODUÇÃO**

### 1.1 PROBLEMÁTICA

O uso de vigas mistas em projetos de edifícios, pisos e pontes tem se consolidado como uma prática crescente na construção civil. (DING *et al.*, 2021; SONG *et al.*, 2022; VIGNERI; ODENBREIT; ROMERO, 2021; WANG *et al.*, 2020). Em países da Europa, Estados Unidos, Canadá e Austrália, a adoção dessas estruturas é cada vez mais evidente (FERREIRA; MARTINS; DE NARDIN, 2020). No Brasil, não é diferente, construções como shoppings, hospitais e edifícios em cidades como São Paulo, Salvador e Recife vem utilizando essa solução estrutural (GERDAU, 2014) .

Conforme se observa na Figura 1.1, a viga mista é um elemento estrutural que combina perfil de aço e uma laje de concreto ligadas por conectores de cisalhamento. Por conta dessa interação, o conjunto consegue resistir a altas cargas, pois aproveita as melhores propriedades de ambos os materiais: o aço resistindo as tensões de tração e a laje de concreto as tensões de compressão (LACKI *et al.*, 2019). Além disso, esse tipo de estrutura simplifica a execução, pois reduz a altura dos elementos, diminui o peso próprio e minimiza, ou até elimina, a necessidade de fôrmas e escoramentos (QUEIROZ; VELLASCO; NETHERCOT, 2007).

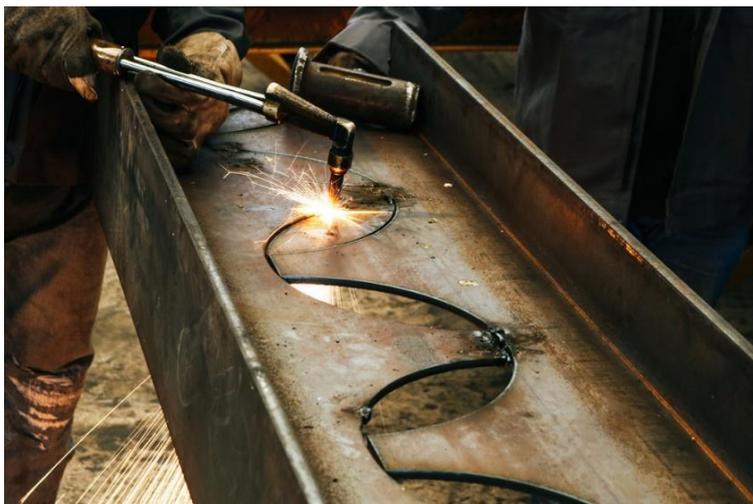
**Figura 1.1:** Viga mista de perfil metálico I com laje maciça.



Fonte: Autor (2024)

Com o passar do tempo novas tendências e ideias foram surgindo para otimizar cada vez mais essas vigas. No início dos anos 1990, por exemplo, foram desenvolvidos o corte automatizado e a solda, os quais permitiram a criação das vigas alveolares com baixo custo. A fabricação dessas vigas é realizada por meio de corte térmico e soldagem das aberturas sequenciais ao longo da alma (Figura 1.2), um processo que amplia a seção transversal e, conseqüentemente, aumenta a resistência à flexão.

**Figura 1.2:** Corte das Vigas celulares



Fonte: Benjamin Salazar<sup>1</sup>

No entanto, a introdução de perfis alveolares em vigas mistas resultou em novas instabilidades no elemento. Estudos indicam que vigas mistas celulares submetidas a momentos positivos são particularmente suscetíveis à instabilidade no montante da alma (FMA), ao mecanismo de Vierendeel (MV) e ao esmagamento da laje de concreto (PARK; KIM; YANG, 2003; SHEEHAN *et al.*, 2016).

Embora o aço comum e o concreto convencional sejam amplamente utilizados, ambos apresentam limitações no enfrentamento desses modos de instabilidade. Para alcançar a resistência e a rigidez exigidas, seria necessário um aumento significativo no volume dos materiais, o que resultaria em uma estrutura mais pesada e menos econômica.

Nesse contexto, a incorporação de materiais de alta resistência surge como uma solução. Esses materiais permitem diminuir as instabilidades, aumentar o desempenho estrutural e reduzir o consumo de recursos. No Brasil, o nióbio se destaca como um elemento estratégico na produção de aço de alta resistência. Segundo a CBMM (2024), o nióbio é um metal de transição com características notáveis, cujo processamento metalúrgico possibilita a obtenção de produtos que aprimoram propriedades e funcionalidades em diversas aplicações, incluindo seu uso em perfis metálicos em AAR para estruturas de edifícios e pontes. A adição de pequenas porcentagens de nióbio às ligas metálicas aumenta a resistência dos perfis em cerca de 30%, sem alterar o módulo de elasticidade e reduzindo seu peso. Estudos como os de Benedito *et al.* (2024), Padilha (1989), Oliveira (2015) e Soldatti (2015) também apontam que o nióbio contribui

---

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://stock.adobe.com/br/contributor/210297272/benjamin-salazar>> Acesso em: 24 nov. 2023.

significativamente para o aumento da resistência mecânica e à corrosão em ligas metálicas. Dessa forma, seu uso na construção civil está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), pois permite a redução do consumo de material, da pegada de carbono e da emissão de gases do efeito estufa, além de mitigar os impactos de eventos climáticos extremos. Além disso, a maior resistência dos aços enriquecidos com nióbio resulta em maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo.

A escolha de materiais de alta resistência exige uma análise detalhada, especialmente porque as normas e os manuais técnicos ainda apresentam lacunas sobre o comportamento desses elementos sob altas cargas. Um ponto crucial é que ainda não está claro se as variações geométricas com o uso de materiais de alta resistência, resultam em respostas semelhantes às observadas com o uso de aço e concreto convencionais.

### **1.2 JUSTIFICATIVA**

A ideia do avanço estrutural para elementos cada vez mais otimizados, não vem apenas da necessidade de tornar o produto final mais barato, mas de uma melhor administração dos materiais utilizados na construção civil.

O aumento significativo na demanda por infraestrutura ao redor do mundo intensificou a extração de recursos naturais como a areia, o cascalho e a argila. Segundo a UNEP IRP (2024) a extração destes materiais cresceu de 9,6 bilhões de toneladas em 1970 para 45,3 bilhões de toneladas em 2020. Paralelamente, materiais essenciais como aço e cimento tiveram produção anual global em 2022 de 1,9 bilhão e 4,1 bilhões de toneladas, respectivamente (GARSIDE, 2023; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2023). Esse cenário demonstra uma sobrecarga sobre os recursos naturais e reforça a necessidade de repensar o consumo de matéria-prima na construção civil para torná-la mais sustentável.

Ao mesmo tempo, as indústrias também enfrentam desafios quanto ao gerenciamento de resíduos. No caso das cerâmicas sanitárias, por exemplo, o fluxo de importação e exportação registrou um crescimento global de 71,3% entre 2010 e 2022, passando de 2,16 milhões para 3,7 milhões de toneladas anuais, com uma taxa média de crescimento anual de 4,6% (BARALDI, 2023). No Brasil, a produção anual de louças sanitárias atinge 22 milhões de unidades, posicionando o país como o terceiro maior produtor mundial (ANFACER, 2023). Esses números reforçam a oportunidade e a

necessidade de reaproveitar resíduos dessas indústrias para reduzir o impacto ambiental e contribuir para uma economia circular.

Nesse contexto, o desenvolvimento de elementos mais eficientes desempenha um papel essencial na redução do consumo de matéria-prima. A utilização de aço de alta resistência possibilita uma redução no volume de material empregado, ao mesmo tempo em que mantém ou melhora o desempenho estrutural. Já no caso do concreto de alta resistência, a incorporação de agregados reciclados provenientes da indústria cerâmica surge como uma alternativa para mitigar a extração excessiva de agregados naturais e contribuir para a destinação sustentável de resíduos industriais.

Porém, apesar das vantagens, a aplicação de materiais de alta resistência em vigas mistas também traz desafios devido à escassez de pesquisas específicas sobre essa abordagem. Para garantir a segurança e o desempenho dessas estruturas, é fundamental que as normas e manuais técnicos sejam investigados, comparando os resultados analíticos e numéricos, e considerando tanto as características dos materiais de alta resistência quanto a influência das variações geométricas do elemento.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo principal desta pesquisa é realizar uma investigação numérica da instabilidade no montante da alma em vigas mistas submetidas a momentos fletores positivos. A pesquisa considera vigas compostas por perfil de aço e de concreto de alta resistência com substituição parcial de agregado reciclado proveniente de louças sanitárias.

Para alcançar esse objetivo realiza-se os seguintes objetivos secundários:

- Desenvolver um traço de concreto com base em modelos da literatura, substituindo 50% do agregado miúdo natural por areia reciclada proveniente de louças sanitárias. Esses ensaios forneceram os valores necessários para configurar o modelo constitutivo no ABAQUS®, representando o comportamento mecânico global do concreto nas simulações;
- Validar, por meio de modelos experimentais e com base na literatura, o comportamento do aço, do concreto de alta resistência e dos perfis celulares para a calibração dos modelos numéricos.
- Investigar a influência de diferentes configurações geométricas dos perfis celulares, por meio de variações paramétricas;

- Analisar o impacto das propriedades dos materiais, incluindo diferentes resistências do aço e do concreto, além de estudar o efeito do posicionamento dos enrijecedores e a variação na espessura da alma;
- Comparar os resultados obtidos com as normas e manuais da literatura.

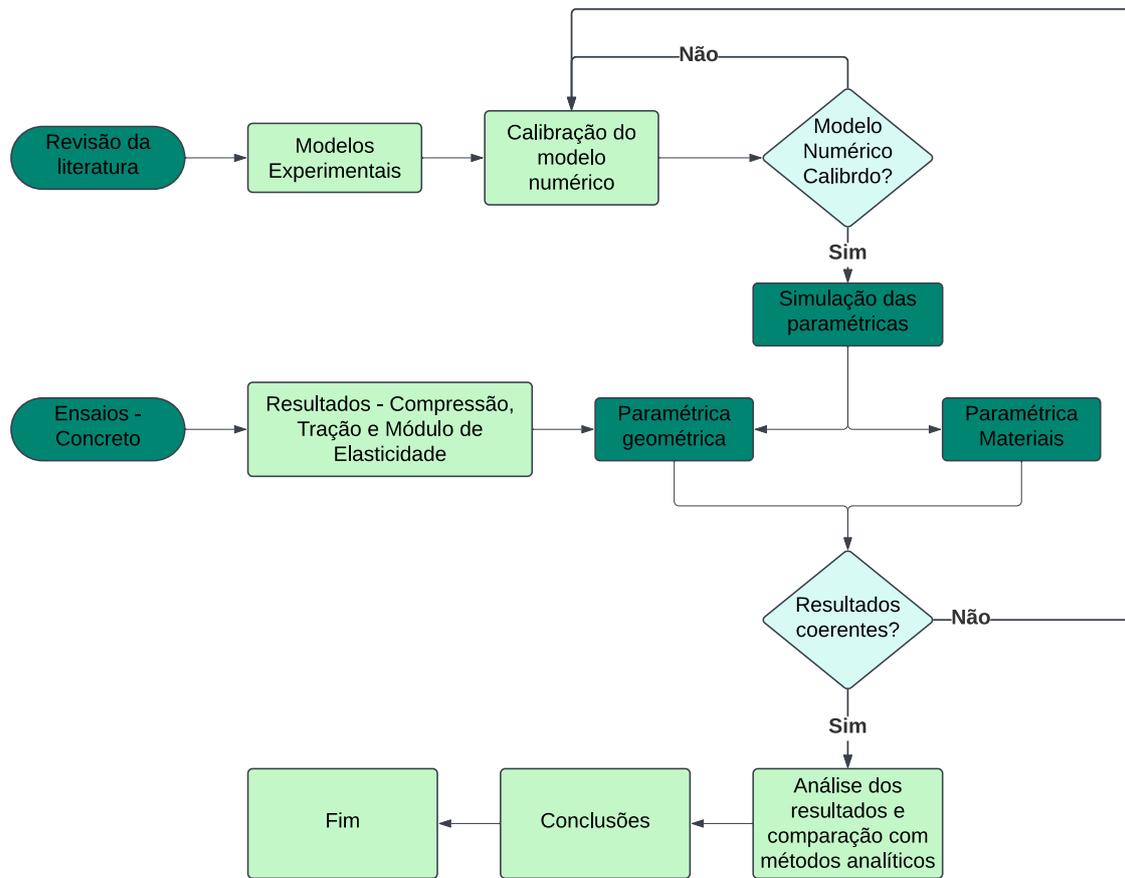
### 1.4 SÍNTESE DA METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida em quatro focos principais. Primeiramente, definiu-se o traço de concreto com base na literatura, visando obter um concreto de alta resistência com a substituição do agregado miúdo pelo agregado reciclado. Em seguida, foi realizada uma revisão bibliográfica para identificar modelos experimentais representativos das características principais das estruturas investigadas, abrangendo estudos sobre o uso de aço e concreto de alta resistência, bem como de vigas celulares. A partir disso, o modelo numérico foi calibrado com parâmetros que pudessem capturar tais comportamentos.

Após a calibração, foram conduzidas duas análises paramétricas: uma focada na variação geométrica e outra na variação de materiais na estrutura, ambas comparadas com os parâmetros de manuais e normas técnicas.

Para facilitar este processo, contou-se com o suporte do grupo de pesquisa GPNum por meio do Projeto Chamada no. 064/2022, aprovado pelo CNPq (Processo: 421785/2022-5: Inteligência Artificial para análises de estruturas mistas aço-concreto), que permite processamento em nuvem via *Amazon Web Services* (AWS) e também com o suporte financeiro do CNPq por meio dos projetos 403900/2021-2 : Investigação de vigas alveolares mistas de aço-concreto com lajes em CRFA e CARRFA e Processo 408498/2022-6 : Perfis alveolares de aço de alta resistência (Fe-Nb) em estruturas mistas de aço e concreto de alto desempenho para obras de infraestrutura. Por fim, foram analisados e discutidos os resultados obtidos, os quais são apresentados ao final da pesquisa. Na Figura 1.3 é definido um fluxograma da metodologia para melhor visualização.

Figura 1.3: Fluxograma da metodologia sintetizada



Fonte: Autor (2025)

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### 2.1 VIGAS MISTAS ALVEOLARES

#### 2.1.1 Conceito

De acordo com Griffis (1994), as primeiras aplicações de vigas mistas ocorreram em 1894, nos Estados Unidos, com a construção de uma ponte e de um edifício que empregaram vigas metálicas revestidas em concreto para proteção contra corrosão e fogo. Em geral, elas são compostas por três partes: a viga metálica em perfil I, a laje de concreto e, para que seja garantido o trabalho em conjunto, os conectores de cisalhamento.

Na maioria dos casos, essa estrutura é configurada de maneira biapoiada, gerando o momento positivo, o qual traciona o perfil I metálico e comprime a laje de concreto. Isso garante uma otimização, pois extrai as melhores características de cada componente. A combinação da alta resistência à tração do aço com a elevada resistência à compressão da laje de concreto, confere às vigas mistas vantagens expressivas em termos de resistência à flexão, quando comparadas às tradicionais vigas de concreto armado.

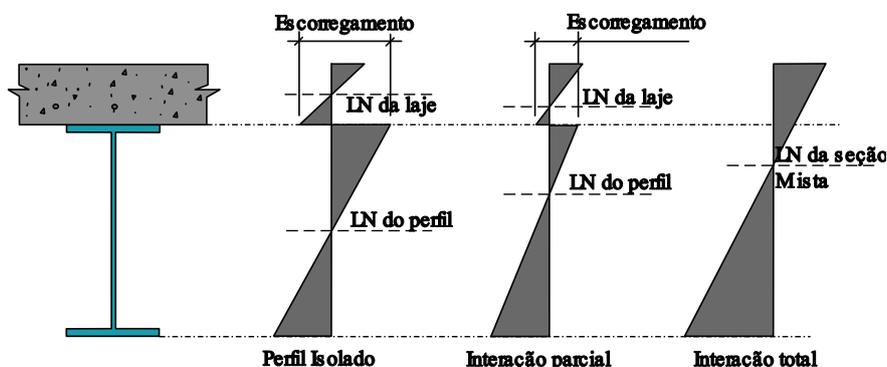
Esses benefícios são ainda mais destacados pela significativa redução, entre 30% a 40%, do peso próprio, o que possibilita a criação de vãos mais amplos (FERREIRA *et al.*, 2021a; SHAO; DENG; CAO, 2019). Além disso, as vigas mistas de aço-concreto desempenham um papel fundamental na aceleração dos processos construtivos (WANG *et al.*, 2022; YANG; XIE, 2023), contribuindo significativamente para a eficiência e a rapidez nas fases de construção.

Para garantir que a estrutura opere de maneira integrada, ou seja, deformando-se como um único elemento coeso, é essencial estabelecer uma interface aço-concreto totalmente conectada. A condição de “interação total” refere-se à capacidade da conexão resistir plenamente às forças aplicadas. Em contraste, existe a “interação parcial”, marcada por uma descontinuidade nas linhas neutras da seção transversal, uma passando pelo perfil e outra pela laje (Figura 2.1). E m resumo, a interação total impede qualquer deslizamento do concreto sobre a laje, garantindo sua aderência completa, enquanto a interação parcial permite um certo deslizamento entre os materiais.

De acordo com Barbosa (BARBOSA, 2017), os estudos sobre vigas mistas ganharam destaque em diversas regiões do mundo no início do século XX. No Canadá, a *Dominion Bridge Company* conduziu investigações sobre vigas revestidas com concreto em 1923. No Reino Unido, o *National Physical Laboratory* publicou resultados de ensaios realizados em 1925. Já nos Estados Unidos, em 1926, Kahn obteve uma patente relacionada a vigas mistas, enquanto Caughey explorava o comportamento dessas

estruturas formadas por aço e concreto. Com o passar dos anos, a necessidade de encontrar soluções mais eficientes impulsionou pesquisas voltadas a componentes específicos das vigas mistas, como conectores (CHEN *et al.*, 2024), lajes com geometrias distintas (ZHU *et al.*, 2020) e a utilização de lajes mais resistentes (HE *et al.*, 2023).

**Figura 2.1:** Interação aço-concreto no comportamento de vigas mistas.

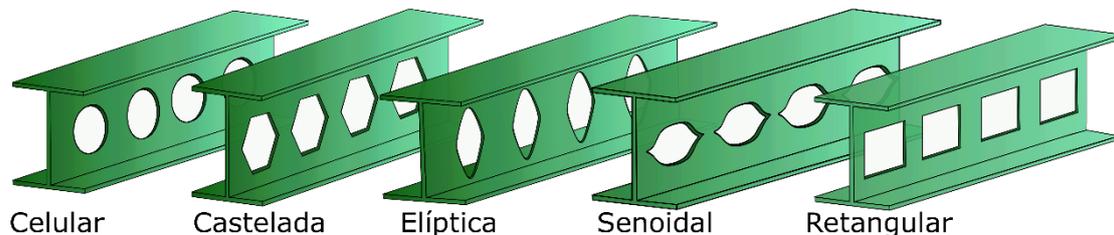


Fonte: Autor (2025)

Entre as inovações, destaca-se o emprego de aberturas na alma dos perfis de aço em vigas mistas, uma abordagem eficiente que não apenas aprimora a resistência à flexão, mas também permite a passagem de tubulações. Essa técnica de alma expandida foi introduzida pela primeira vez em 1910 pela *Chicago Bridge and Iron Works*, uma empresa fundada em 1889 (DAS; SRIMANI, 1984).

Atualmente, existem diferentes tipos de aberturas na alma que caracterizam as vigas alveolares (aberturas circulares, hexagonais, elípticas, senoidais, retangular e entre outros - Figura 2.2). As mais utilizadas são as casteladas (aberturas hexagonais) e as celulares (aberturas circulares). De acordo com Erdal e Saka (2013), as aberturas celulares oferecem uma alternativa mais eficiente e econômica em comparação com as casteladas, graças à sua geometria flexível que permite variar amplamente o diâmetro e o espaçamento das aberturas.

**Figura 2.2:** Aberturas alveolares em Perfis I

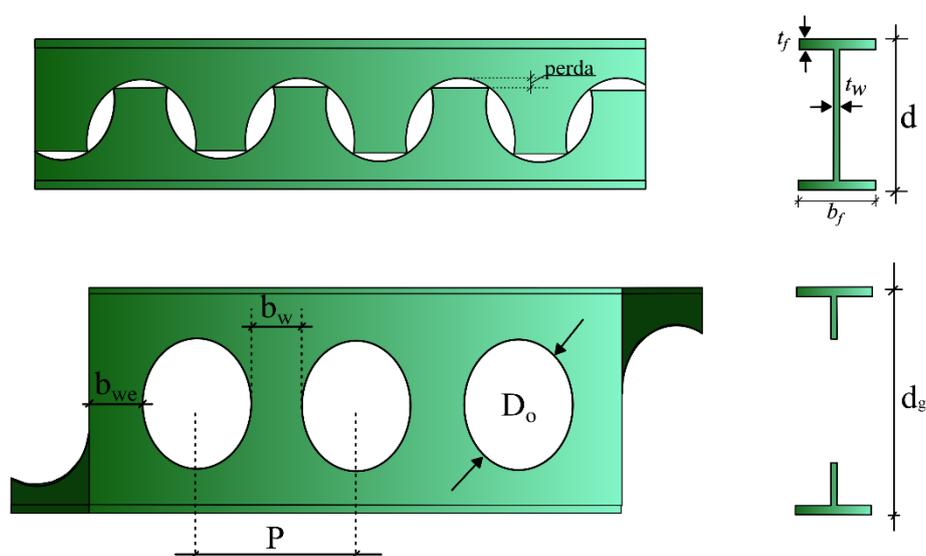


Fonte: Autor (2025)

### 2.1.2 Desenvolvimento e processo de fabricação de vigas mistas celulares

Os perfis celulares são feitos a partir de dois cortes longitudinais na alma que formam uma disposição semicircular (Figura 2.3 e Figura 2.4). Em seguida é realizado a separação dessas duas partes, posicionadas de maneira a formar os círculos, soldando as partes internas da viga para junção dos elementos e retirada as sobras das extremidades da peça. Essa ideia dos perfis celulares teve origem principalmente no campo da arquitetura, onde estruturas de aço com aberturas circulares incorporadas na parte central foram valorizadas por sua estética atraente (ERDAL; SAKA, 2013).

**Figura 2.3:** Esquema do corte dos semicírculos do Perfil I



Fonte: Autor (2025)

**Figura 2.4:** Corte dos semicírculos do Perfil I



Fonte: Benjamin Salazar<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://stock.adobe.com/br/contributor/210297272/benjamin-salazar>> Acesso em: 24 nov. 2023.

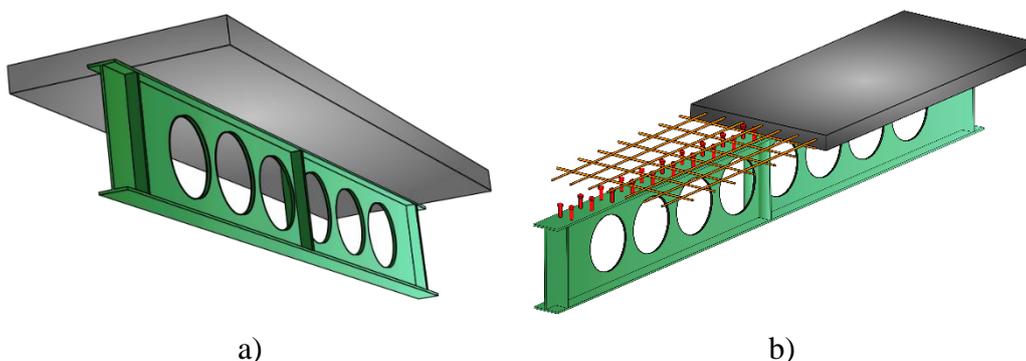
Faria et al. (2021), explicam que a integração de serviços na construção com esse tipo de estrutura se torna muito mais eficaz como mostra a Figura 2.5 na qual a tubulação passa por entre os perfis celulares. Com o perfil I celular pronto, a segunda etapa pode seguir duas vertentes: se a laje for maciça, soldam-se os conectores de cisalhamento na mesa superior do perfil I e monta-se a forma da laje para a concretagem. Em caso de uso do steel deck, posiciona-se a forma de steel deck, soldam-se os pinos e, em seguida, procede-se à concretagem da laje. Na maioria dos casos, também é comum a adição de armaduras de reforço na laje, como ilustrado na Figura 2.6 - b)

**Figura 2.5:** Utilização de vigas alveolares



Fonte: C-Beams (2023)<sup>3</sup>

**Figura 2.6:** a) Perfil I Celular com laje Maciça; b) Componentes da Viga mista



Fonte: Autor (2025)

### 2.1.3 Modos de falha

As vigas metálicas em formato I, quando submetidas à flexão, podem enfrentar várias instabilidades, antes mesmo de se atingir o limite de resistência dos materiais. Segundo El-sawy, Sweedan e Martini (2014), essa instabilidade pode acontecer de maneira local ou global na viga metálica de alma cheia.

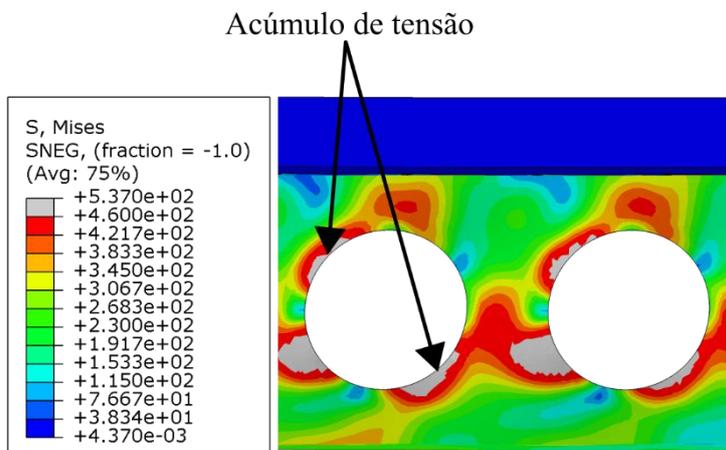
<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.c-beams.com/projects/>> Acesso em: 09 ago. 2023.

O perfil I celular apresenta uma complexidade ainda maior nesse aspecto. De acordo com estudos que investigaram o comportamento à flexão em vigas celulares de aço, diversos modos de falha podem ocorrer. Estas incluem o Mecanismo de Vierendeel (MV), instabilidade lateral com torção (FLT), instabilidade no montante da alma (FMA), instabilidade local da alma e a distorção da alma (DA)

### 2.1.3.1 Mecanismo de Vierendeel

O funcionamento do MV está ligado à concentração de tensões de cisalhamento. Este fenômeno se manifesta através de distorções e da formação de rótulas plásticas em áreas próximas às aberturas (PANEDPOJAMAN; THEPCHATRI; LIMKATANYU, 2014). De um ponto de vista físico, o MV ocorre quando o aço, atinge o seu limite máximo de resistência. Este limite é alcançado devido à combinação de dois tipos de tensões: normais e de cisalhamento. É importante ressaltar que essa deformação pode ocorrer tanto na presença quanto na ausência de reforços próximos às aberturas. Na Figura 2.7 é ilustrado o comportamento desta instabilidade.

**Figura 2.7:** Mecanismo Vierendeel



Fonte: Autor (2023)

### 2.1.3.2 Instabilidade no montante da alma

A instabilidade no montante da alma se torna crítica quando a largura do montante da alma é reduzida (GRILO *et al.*, 2018). Segundo Badke-neto, Calenzani e Ferreira (2015) a força de cisalhamento, que surge ao longo da junta soldada, solicita o montante da alma à flexão, gerando esforços de tração e compressão em lados opostos. Durante a flambagem do montante, a região comprimida tende a se deslocar para fora do plano longitudinal do perfil, enquanto a região tracionada tende a permanecer em sua posição inicial. (Figura 2.8). Esse tipo de colapso geralmente ocorre em um estágio inelástico,

com uma notável deformação plástica das seções envolvidas (KERDAL; NETHERCOT, 1984).

**Figura 2.8:** Instabilidade no montante da alma por cisalhamento

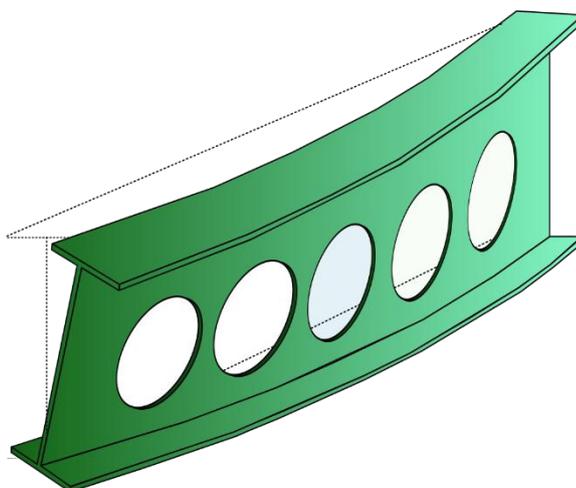


*Fonte: Badke-neto, Calenzani e Ferreira (2015)*

### 2.1.3.3 Instabilidade lateral com torção

Este modo de falha ocorre quando uma viga perde sua estabilidade na direção perpendicular ao eixo principal, resultando em deslocamentos laterais acompanhados de torção adicional (FERREIRA; MARTINS; DE NARDIN, 2021a). Em vigas celulares esse fenômeno ocorre pelo fato do “tê” comprimido ser insuficientemente suportado lateralmente (Figura 2.9) (CORREA DE FARIA *et al.*, 2021; SONCK; BOISSONNADE; VAN IMPE, 2012; SONCK; BELIS, 2017).

**Figura 2.9:** Instabilidade Lateral com torção

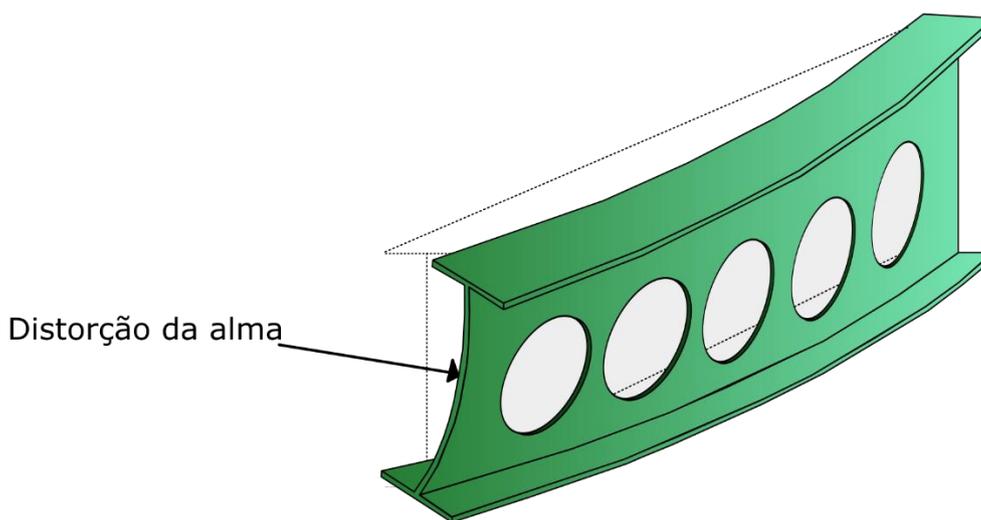


*Fonte: Autor (2024)*

### 2.1.3.4 Distorção da alma

A distorção da alma (Figura 2.10) é o resultado de uma curvatura lateral da viga somado a torção, fazendo com que a capacidade de resistência à torção do perfil de aço diminua consideravelmente. Desta maneira, a instabilidade local e lateral pode se combinar e gerar uma deformação lateral e a distorção da peça.

**Figura 2.10:** Distorção da alma



*Fonte: Autor (2024)*

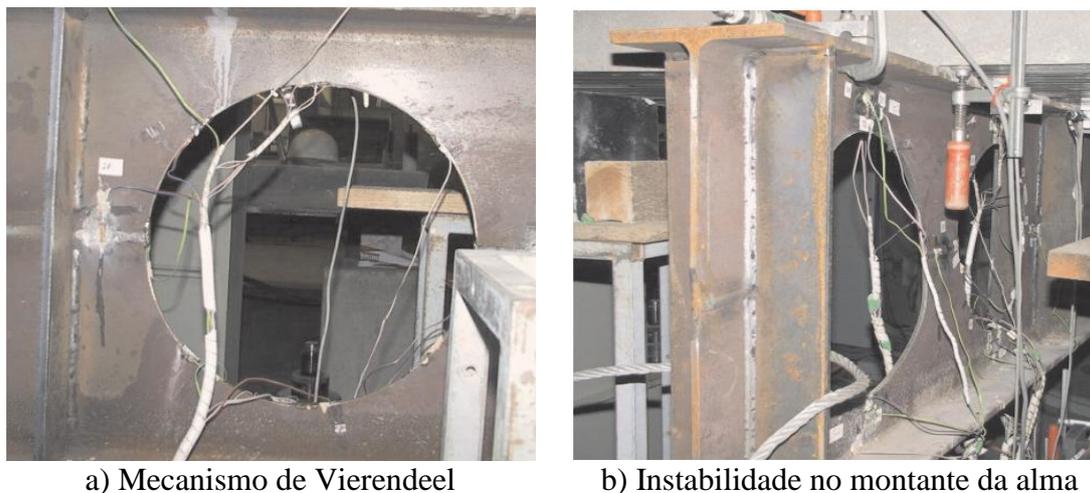
### 2.1.4 Resultados e avanços em pesquisas precedentes

Pesquisas recentes concentram-se na análise dos parâmetros geométricos, como o tamanho e o espaçamento das aberturas celulares, além da interação entre o aço e o concreto em materiais convencionais. Esta seção apresenta uma análise dos resultados obtidos em pesquisas relevantes, oferecendo um panorama das descobertas mais representativas e das direções futuras sugeridas na literatura.

#### 2.1.4.1 Influência da laje de concreto

Müller et al. (2006) realizou uma investigação sobre o comportamento de vigas mistas com aberturas celulares na alma, eliminando a laje em um dos apoios para avaliar especificamente a contribuição da ação mista. Os principais resultados indicaram que, A ausência da laje mista na abertura final permitiu o desenvolvimento do mecanismo de Vierendeel em baixos níveis de carga (Figura 2.11a). Contudo, a viga falhou por instabilidade no montante da alma na abertura desprovida de concreto (Figura 2.11b), indicando que o concreto desempenha um papel relevante no suporte contra esse modo de instabilidade.

**Figura 2.11:** Comportamento das instabilidades no ensaio com ausência da laje mista na seção final.



*Fonte: Müller et al. (2006)*

Cho e Redwood (1992) realizaram nove testes em escala real com vigas mistas contendo aberturas na alma, com o objetivo de entender os mecanismos pelos quais a laje contribui para o suporte da força cortante vertical. O estudo destacou que a posição estratégica dos conectores próximos às aberturas aumenta a eficiência da laje de concreto na resistência ao cisalhamento (CHO; REDWOOD, 1992). Além disso, os pesquisadores concluíram que a largura da laje de concreto não é um fator crítico, a menos que seja insuficiente para permitir o desenvolvimento adequado da zona de transferência de esforços dos pinos, o que prejudicaria a resistência dos conectores. Por fim, Cho e Redwood (1992) comentam que em lajes maciças, a falha ocorre na zona de apoio, próxima à extremidade de baixo momento, gerando fissuras de tração.

Recentemente Jia *et al.* (2024) realizaram testes experimentais e numéricos em vigas mistas casteladas. Os resultados indicaram que a laje atua como um elemento estabilizador, limitando os movimentos rotacionais e laterais da viga. Isso resulta em melhor desempenho estrutural, maior resistência contra flambagem e maior capacidade de carga do sistema misto

### 2.1.4.2 Influência da geometria do perfil

Müller et al. (2006) abordaram o efeito do alongamento das aberturas na alma da viga, uma modificação que, de acordo com os resultados obtidos, resultou em uma redução de aproximadamente 40% na resistência da estrutura. Essa diminuição significativa pode ser atribuída ao aumento das tensões concentradas ao redor das bordas

das aberturas que levaram a falha pelo mecanismo de Vierendeel (MÜLLER *et al.*, 2006) (Figura 2.12).

**Figura 2.12:** Comportamento das instabilidades em aberturas alongadas



*Fonte: Müller et al. (2006)*

Djebli e Abidelah (2019), aprimorou o modelo analítico proposto por Raftoyiannis e Ioannidis (2006) para calcular a deformação total de vigas mistas celulares simétricas, levando em conta o impacto das aberturas nas almas das vigas e a presença da laje de concreto. As aberturas, afetam a rigidez da viga, principalmente ao introduzir um efeito de cisalhamento vertical nas áreas ao redor das aberturas, o que aumenta as deformações locais (DJEBLI; KERDAL; ABIDELAH, 2019). O modelo desenvolvido incorporou essas influências, proporcionando uma análise mais precisa do comportamento da viga sob carregamentos transversais. Além disso, os autores observaram que a deformação é mais relevante em vigas curtas, onde o efeito de cisalhamento vertical nas aberturas é mais pronunciado.

Kang, Hong e Liu (2021) investigaram experimental e numericamente os efeitos da posição, largura, quantidade e tamanho das aberturas em vigas celulares de aço convencionais. Concluíram que o espaçamento entre os alvéolos reduz a resistência, enquanto a diminuição do número e do tamanho das aberturas aumenta a resistência. Wang *et al.* (2016) analisaram o comportamento da FMA em vigas de aço convencionais com aberturas casteladas sob cisalhamento vertical, por meio de análises numéricas. Estes autores propuseram equações para a resistência à instabilidade e destacaram a relação entre as dimensões do montante e o ângulo das aberturas como fatores críticos para a resistência e os modos de falha.

Ferreira *et al.*, (2021b) realizaram um estudo paramétrico com 120 modelos, analisando as instabilidades em vigas mistas celulares, variando esbeltez e diâmetros das aberturas. Os resultados indicaram perfis mais esbeltos são mais vulneráveis à

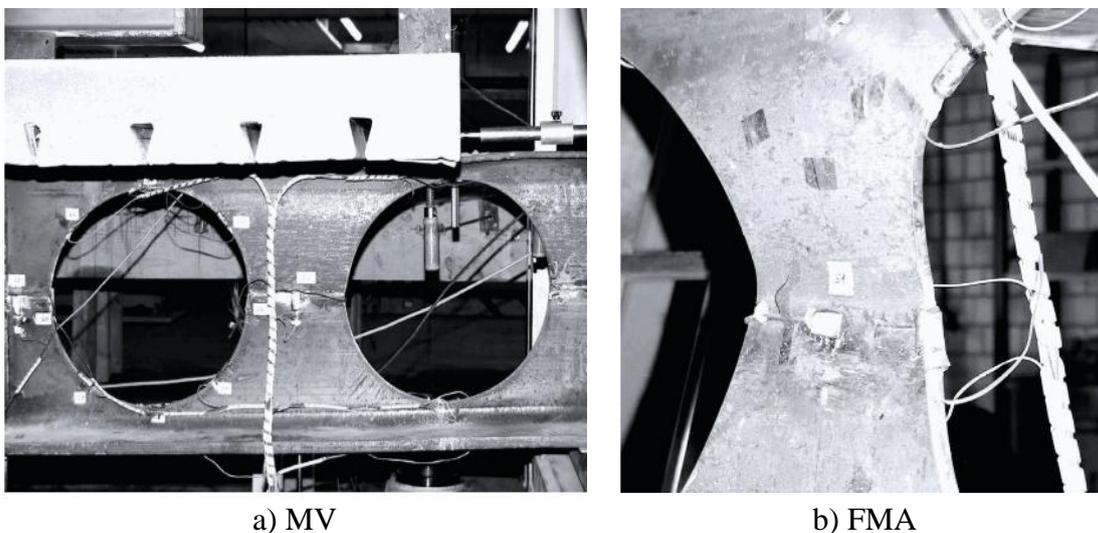
instabilidade devido ao deslocamento lateral da alma. O cisalhamento crítico global aumentou com a diminuição do diâmetro das aberturas e o aumento da largura do montante da alma.

Jia *et al.* (2024) examinaram experimental e numericamente o comportamento pós-flambagem de vigas mistas casteladas, avaliando o impacto do tamanho das aberturas, espessura da alma e presença da laje de concreto. Concluíram que o aumento da espessura da alma eleva significativamente a carga crítica, enquanto o aumento no número de abertura reduz essa carga.

### 2.1.4.3 Perfis assimétricos

Müller *et al.* (2006) realizou uma análise em perfis de seções assimétricas, ou seja, a seção do tê superior é diferente da seção do tê inferior. Os resultados demonstraram que o MV ocorre desde os primeiros níveis de carga, influenciado diretamente pela geometria celular da seção (Figura 2.13a). No entanto a falha final acontece por conta da FMA (Figura 2.13b) influenciado pela variação da espessura da alma.

**Figura 2.13:** Comportamento das instabilidades no ensaio de perfis assimétricos



*Fonte: Müller et al. (2006)*

No estudo realizado por Sheehan *et al.* (2016) foram testados vigas celulares mistas assimétricas de grande vãos. O estudo focou em vigas celulares com aberturas circulares regulares e uma abertura alongada na meia-extensão, com um grau de conexão de cisalhamento de 36%, significativamente abaixo do recomendado pela EN 1994-1-1 (2004). As vigas foram testadas sem escoramento durante a construção e submetidas a cargas uniformemente distribuídas e cargas concentradas. Os resultados indicam que as

vigas resistiram a 3,4 vezes a carga estimada de projeto, mesmo com um grau de conexão de cisalhamento consideravelmente menor que o mínimo exigido. Durante o teste de carga de cisalhamento, foi observado um platô na relação carga x deslocamento, indicando o atingimento da carga máxima. Os autores observaram que o MV gerou deformações significativas ao redor das aberturas da alma (Figura 2.14), especialmente nos montantes. Nessas áreas, o material apresentou deformações superiores ao dobro do limite de escoamento, indicando que essas regiões são os pontos mais vulneráveis.

**Figura 2.14:** Mecanismo de Vierendeel desenvolvido na abertura alongada



*Fonte: Sheehan et al. (2016)*

### 2.1.4.4 Investigação dos modos de falha em vigas mistas celulares

Hechler, Müllere Sedlacek (2006) testaram vigas mistas celulares simétricas e assimétricas, observando a predominância de falhas por MV em áreas reforçadas e falhas por FMA em áreas não reforçadas.

Os pesquisadores Nadjai et al. (2007) e Vassart (2009) realizaram uma investigação experimental e numérica sobre o comportamento de quatro vigas mistas celulares a temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Todas as vigas foram projetadas para garantir interação completa entre os materiais, utilizando conectores pino com cabeça para transferência de esforços. Os resultados mostraram que as vigas falharam por FMA, independentemente das condições de temperatura (Figura 2.15).

Nos ensaios realizados sob incêndio, as temperaturas de falha indicaram que os fatores de redução dependentes da temperatura, comumente aplicados pelas normas, não são suficientes para prever com precisão a ocorrência de FMA.

**Figura 2.15:** FMA desenvolvidas nos perfis celulares

Fonte: Vassart (2009)

Ferreira *et al.* (2021b), ao realizarem uma análise numérica de 120 vigas mistas celulares, destacaram a predominância da FMA como modo de colapso principal. Além disso, os resultados evidenciaram a natureza conservadora das prescrições dos modelos de Ward (1990), GRILO *et al.* (2018) e Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014), quando comparadas aos modelos numéricos.

## 2.2 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA (AAR) E CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)

A demanda por estruturas com vãos maiores, aliada à necessidade de construção ágil, tem impulsionado o uso de materiais de alto desempenho (HAO *et al.*, 2025). Nesse cenário, os aços de alta resistência, com tensão de escoamento acima de 460 MPa, destacam-se pelo excelente desempenho em tração, escoamento e resistência à flexão (FANG; CHAN, 2018a, 2019a; QIANG; BIJLAARD; KOLSTEIN, 2012).

Uma das estratégias mais utilizadas na fabricação de aços de alta resistência é a adição de nióbio (Nb) à sua composição. Zhang *et al.* (2022) analisaram a microestrutura de aços contendo 0,00% e 0,03% em peso de Nb e observaram que a presença desse elemento promove um refinamento significativo dos grãos, contribuindo para o aumento da resistência do material.

Além disso, Zong e Liu (2021) analisaram a adição de nióbio (Nb) em teores de 0,035%, 0,069%, 0,084% e 0,107% em peso e verificaram um aumento na resistência ao escoamento já nas menores concentrações, evidenciando o efeito positivo do Nb no fortalecimento do material. De maneira similar, Jack e Szpunar (2023) observaram que a elevação do teor de Nb de 0,008% para 0,080% (em peso) afetou o alongamento e a ductilidade do material, com ganho de aproximadamente 17,0% na resistência do modelo.

A eficácia da adição de Nb na produção de aços de alta resistência (AAR) destaca-se ainda mais no contexto brasileiro. Segundo o Serviço Geológico do Brasil (2024), o país lidera a produção mundial desse elemento, sendo responsável por cerca de 90% da produção global e detentor de aproximadamente 95% das reservas conhecidas. Assim, o

uso do Nb não apenas aprimora as propriedades mecânicas do aço, mas também representa um diferencial estratégico para a indústria siderúrgica brasileira.

Dessa forma, evidencia-se que o aprimoramento das propriedades mecânicas do aço contribui diretamente para o aumento de sua resistência. No entanto, este estudo se concentrará nos benefícios globais dos aços de alta resistência, analisando suas características mecânicas e seu impacto no desempenho estrutural.

Ban e Bradford (2013) desenvolveram um modelo tridimensional de elementos finitos para investigar o comportamento à flexão de vigas mistas compostas por AAR e concreto. Os autores observaram que a análise rígido-plástica superestimou a resistência à flexão dessas vigas, e recomendaram fatores de redução para a resistência do aço. Além disso, o estudo indicou que o comportamento de deformação não linear das vigas mistas diminui à medida que se aumenta a resistência do aço ou o índice de conexão por cisalhamento. Os pesquisadores também constataram que as normas de projeto superestimam a rigidez inicial das vigas mistas com conexão por cisalhamento total.

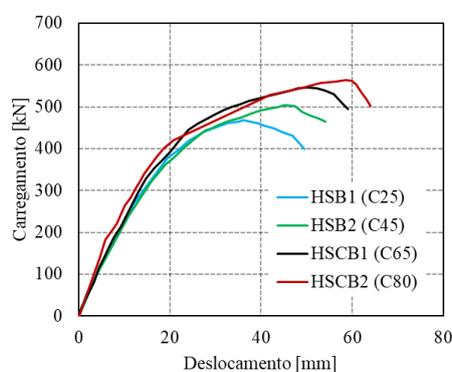
Complementando essas investigações, Shamass e Cashell (2017) realizaram um estudo paramétrico investigando numericamente a influência do grau de aço, o grau de conexão por cisalhamento e a distribuição dos conectores. Os autores observaram que, para vigas com conexão parcial ( $\eta \leq 0,5$ ), o método de análise rígido-plástico empregado no Eurocode 4 fornece resultados ligeiramente conservadores. No entanto, ao aplicar uma interação total ( $\eta = 1,0$ ), a diferença entre os resultados numéricos e analíticos aumentam entorno de 8%. Além disso, Shamass e Cashell (2017) destacaram que o aumento do grau de conexão e da resistência do aço resultou em um menor deslocamento e maior carga máxima suportada pelas vigas. Também foi observado que a concentração de conectores de cisalhamento próxima aos apoios, tanto em vigas com conexão parcial quanto total, reduziu significativamente as forças de cisalhamento nos pinos e ao longo da viga.

Zhao e Yuan (2010), diferente dos autores anteriores, além da aplicação do ARR realizaram um estudo experimental investigando a influência do CAR. As vigas biapoiadas foram submetidas a cargas concentradas em dois pontos, permitindo analisar aspectos como os modos de falha, o comportamento carga-deflexão, a resposta à deformação e o deslizamento na interface. Os resultados indicaram que o uso de aço e concreto de alta resistência promoveu melhorias de até 55,4% na capacidade resistente ao momento das vigas mistas em comparação com a viga mista de material convencional (ZHAO; YUAN, 2010).

Investigando ainda a influência do uso destes concretos Du *et al.* (2023)

analisando a influência do CAR chegaram em resultados que conforme se aumenta a resistência do concreto, a resistência à flexão final e a ductilidade das vigas melhoram (Figura 2.16).

**Figura 2.16:** Comportamento das estruturas de vigas mistas submetidas a flexão



Fonte: Du et al. (2023)

Tong *et al.* (2022) avaliaram o desempenho à flexão de vigas mistas de AAR e concreto de ultra alto desempenho (UHPC) por meio de experimentos e análises numéricas. Foram realizados quatro testes variando o grau de conexão por cisalhamento e a disposição dos conectores (isolados e agrupados). Os resultados destes autores mostraram que, com conexão parcial, o modo de falha foi a ruptura dos conectores, enquanto com conexão total ocorreu o esmagamento da laje de UHPC. Além disso, os pesquisadores perceberam que as vigas com conectores agrupados possuem maior deflexão e deslizamento na interface aço-concreto na fase plástica, indicando menor rigidez. Por fim, comparando vigas mistas com o UHPC e o concreto C60, verificou-se que o UHPC proporcionou maior rigidez e capacidade última de flexão

### 2.3 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

A escassez de recursos naturais e o aumento na geração de resíduos da construção têm impulsionado o uso de agregados reciclados no concreto como uma solução viável e sustentável. Essa prática não apenas auxilia na gestão eficiente desses materiais, mas também promove a economia circular ao reduzir a extração de recursos como areia, brita e cimento, integrando os resíduos ao ciclo.

Por esse motivo, o interesse pela investigação dos agregados reciclados no concreto tem aumentado significativamente, buscando entender não apenas o desempenho técnico dessas implementações, mas também sua viabilidade econômica e ambiental.

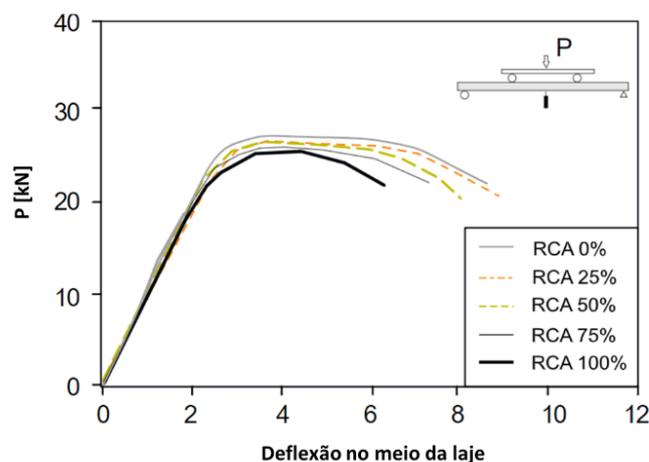
### 2.3.1 Agregado reciclado de construção

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são materiais gerados durante as atividades de construção, reforma e demolição, e sua gestão é um desafio recorrente no setor da construção civil. A reutilização desses materiais como agregados reciclados no concreto representa uma alternativa sustentável, contribuindo para reduzir a dependência de recursos naturais e promovendo práticas mais alinhadas à economia circular.

Robalo *et al.* (2021) desenvolveram um concreto sustentável incorporando resíduos de construção e demolição RCD, denominado “concreto de agregados reciclados com baixo teor de cimento” (CARBC). Eles criaram uma matriz otimizada que substituiu agregados naturais por reciclados em porcentagens de 43% a 80%. A resistência do CARBC foi avaliada, demonstrando que a dosagem otimizada de cimento ( $175 \text{ kg/m}^3$ ) viabiliza seu uso em aplicações estruturais, com redução de resistência limitada a cerca de 30%, mesmo com altos volumes de RCD (até 60%). Os autores concluíram que a perda de resistência é compensada pela alta compactação da matriz e pela maior resistência dos compostos, resultando em um desempenho mecânico comparável ao do concreto convencional.

Rerksamosorn *et al.* (2022) desenvolveram uma pesquisa em lajes de steel-deck com o concreto reciclado de material de construção para avaliar o comportamento da peça submetido a diversas cargas. Destaca-se a descoberta voltada para a resistência da laje, de acordo com a porcentagem de agregado miúdo e graúdo substituído no concreto (Figura 2.17) quando submetida ao teste de quatro pontos. É possível notar que o aumento da porcentagem de substituição diminuiu em pequenas escalas a carga, mas manteve-se uma resistência semelhante ao concreto convencional.

**Figura 2.17:** Carga x Deslocamento



Fonte: Rerksamosorn *et al.* (2022)

Palii *et al.* (2024) desenvolveram um banco de dados abrangente para compilar informações sobre as propriedades físicas e mecânicas do RCD. O estudo integra uma análise estatística das variabilidades dessas propriedades, proporcionando uma compreensão mais detalhada do comportamento do concreto reciclado. Como conclusão, os autores observaram que a substituição de até 25% dos agregados naturais pelo RCD tem um impacto mínimo na resistência à compressão (-8,5%), e a substituição total pode ser viável, com uma redução na resistência à compressão limitada a menos de 10%.

### **2.3.2 Agregado reciclado de resíduos de cerâmica sanitária**

As louças sanitárias, reconhecidas por sua alta durabilidade, resistência mecânica e impermeabilidade, são fabricadas a partir de matérias-primas como argila e caulim. No entanto, o processo produtivo também gera resíduos de louças sanitárias, especialmente devido ao rigoroso controle de qualidade, que descarta itens que não atendem aos padrões estabelecidos (EL-DIEB; MAHMOUD R.; SAMIR I., 2019). Esses resíduos, geralmente enviados para aterros sanitários, apresentam um longo tempo de degradação, estimado em até 4 mil anos (JAVED; SIDDIQUE; PRASAD, 2015).

Por outro lado, as características de durabilidade e resistência desses resíduos potencializa-os como substitutos dos agregados naturais no concreto. Em resposta à crescente necessidade de alternativas sustentáveis, o reaproveitamento de resíduos de louças sanitárias tem ganhado destaque em pesquisas globais, impulsionando soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis.

Em países como a Espanha, para que o volume de resíduos enviado para o aterro sanitário seja reduzido, o maquinário de processamento desses resíduos foram preparados como forma de diminuir o impacto ambiental e econômico da má gestão (MEDINA *et al.*, 2016). Segundo Meyer (2011), a utilização de resíduos não biodegradáveis como matéria-prima na fabricação de novos materiais permitiria a redução de 17% a 24% nos insumos de matéria-prima até 2030. Além disso, seria possível gerar uma economia potencial para a indústria de €630 bilhões por ano (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

Os pesquisadores López *et al.* (2007), investigaram algumas das propriedades físicas e mecânicas de um concreto com substituição de porcentagem do agregado fino (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) por agregado de louças sanitária obtido de entulho de demolição e de resíduos da própria indústria. Como conclusão os autores perceberam que o uso de pó cerâmico branco para substituir parte da areia não reduz a resistência à compressão, mas proporciona um aumento na resistência a compressão, uma vez que com

50% de substituição a resistência aumentou aproximadamente 30%. Em relação a tração a introdução do pó cerâmico não produziu diferença significativa em comparação ao concreto sem agregado reciclado.

Segundo Jackiewicz-rek et al. (2015) a aplicação dos agregados reciclados de cerâmica sanitária como substituição parcial de agregados finos traz um melhoria na porosidade mecânica do concreto e uma eliminação da retração.

Diferente dos anteriores, Medina et al. (2016) substituíram o agregado graúdo pelos agregados reciclados de louças sanitárias nas porcentagens 20% e 25%. Estes autores descobriram que o agregado reciclado no lugar da areia não reduziu a resistência à compressão, mas, devido às propriedades intrínsecas do agregado e às propriedades microelásticas da zona de transição interfacial agregado reciclado/pasta, proporcionou um aumento de 18% na resistência a compressão.

Atualmente, as pesquisas continuam fundamentadas na substituição mencionada anteriormente. No entanto, verifica-se cada vez mais a confirmação de que a troca dos agregados em uma escala apropriada traz resultados vantajosos para o concreto, solidificando-se como uma verdade que ganha respaldo no campo acadêmico.

Neste contexto Elemam, Agwa e Tahwia (2023) investigaram além da substituição do agregado miúdo, a substituição do cimento pelo agregado reciclado. Esses autores observaram que existe uma influência direta da quantidade de agregado reciclado e o slump do concreto. Ao aumentar a proporção de agregado reciclado, constatou-se uma redução no slump, indicando uma alteração na trabalhabilidade do material. No caso da resistência à compressão, os resultados revelaram melhorias quando 25 a 50% do agregado fino foi substituído por material reciclado. A resistência a compressão e a flexão máxima foi alcançada ao substituir 50% do agregado fino reciclado e 10% do cimento com aproximadamente 45MPa e 6,38MPa respectivamente (18% e 8% maior que o concreto convencional). Por fim os pesquisadores observaram que houve um aumento da profundidade de penetração da água no concreto à medida que a quantidade de agregado reciclado fino aumentou, mas diminuiu ao incorporar o agregado reciclado no lugar do cimento.

Prates *et al.* (2024), investigaram o comportamento do concreto de alto desempenho com a substituição do agregado miúdo natural por agregado miúdo proveniente de louças sanitárias. Os resultados mostraram que, com a substituição de 50% do agregado miúdo, o concreto apresentou trabalhabilidade e resistência à compressão similares, com uma diferença de apenas 7 cm no ensaio de slump (indicando maior

trabalhabilidade para o concreto com agregado reciclado) e menos de 2% na resistência à compressão para o concreto sem agregado reciclado.

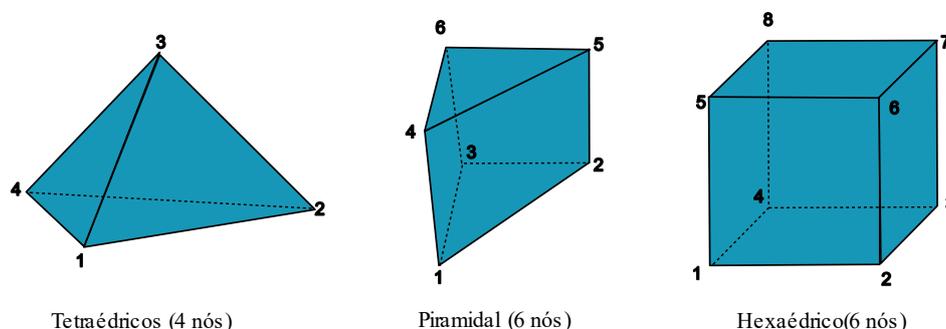
## 2.4 MODELAGEM NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS

A modelagem numérica é uma ferramenta poderosa para simular o comportamento de materiais e estruturas, mas sua precisão depende de diversos fatores. Entre os aspectos mais relevantes estão a escolha adequada da malha de elementos finitos, a consideração de imperfeições geométricas e a definição precisa dos modelos constitutivos. Esses parâmetros, quando bem definidos, garantem resultados mais próximos do comportamento real.

### 2.4.1 Malha de elementos finitos

O ABAQUS utiliza diversos tipos de elementos para representar geometrias e comportamentos estruturais em análises, como elementos sólidos, de casca, de viga e de treliça. A escolha do elemento depende da natureza específica da análise. Em contextos tridimensionais, o ABAQUS oferece elementos 3D, como tetraédricos, piramidais e hexaédricos (Figura 2.18).

**Figura 2.18:** Elementos de malha



*Fonte: Alguhi (2016)*

Elementos de ordem superior, como o hexaédrico de oito nós, geralmente proporcionam resultados mais precisos, embora necessitem de um tempo de cálculo maior. A convergência eficiente da malha é crucial, e o ABAQUS oferece opções de integração completa e reduzida para elementos hexaédricos.

Em geral para vigas mistas os conectores como o pino com cabeça, o atuador e a laje de concreto utilizam elementos sólidos hexaédricos lineares de oito nós com integração reduzida e controle *hourglass* (C3D8R). Essa redução é integrada para que seja diminuído o tempo computacional da análise (PATHIRANA *et al.*, 2016).

Para o Perfil I, a integração de elementos tipo quadrilaterais (S4R) é recomendada,

oferecendo seis graus de liberdade por nó, incluindo três rotações e três translações. Quando armaduras transversais e longitudinais estão presentes, a abordagem utiliza elementos de treliça lineares tridimensionais (T3D2) com dois nós.

Além dessas considerações sobre os tipos de elementos, é relevante analisar o tamanho das malhas utilizadas na literatura. A tabela a seguir apresenta informações sobre o tamanho das malhas em estudos anteriores (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1:** Malhas usadas na literatura em vigas mistas

Referências	Perfil	Laje	Conector	Armadura
Langarudi e Ebrahimnejad (2020)	-	17 mm	5 mm	10 mm
Rossi <i>et al.</i> (2020)	10mm	20mm	2mm	10mm
Nguyen e Lee (2021)	40mm	40mm	10mm	100mm
Kabir, Mia; Islam (2023)	20mm	30mm	-	-

*Fonte: Autor (2025)*

### 2.4.2 Tensões Residuais

As tensões residuais são forças internas dos elementos metálicos, as quais persistem mesmo na ausência de qualquer carga externa aplicada. Essas tensões residuais são atribuídas a diversos fatores, tais como resfriamento desigual, soldagem e/ou moldagem a frio (CHACÓN; SERRAT; REAL, 2012). No entanto, segundo Ferreira e Nardin (2021a), as tensões residuais não precisam ser consideradas, pois não são influentes para vigas mistas submetidas apenas ao momento positivo. Isso ocorre porque, a maior parte da seção da viga trabalha predominantemente em compressão no concreto e tração no aço, distribuindo as tensões de forma mais homogênea. Como o concreto na região comprimida é muito mais rígido que o aço, ele domina o comportamento estrutural, reduzindo o efeito das tensões residuais do aço.

### 2.4.3 Imperfeição Geométrica Inicial

As imperfeições geométricas referem-se a pequenas variações na forma geométrica real de um elemento estrutural em relação à sua forma idealizada ou teórica. No contexto das estruturas metálicas, essas imperfeições podem surgir durante o processo de fabricação e montagem, e podem ter impacto significativo no comportamento e na capacidade de carga dessas estruturas. A curvatura inicial é um exemplo específico de imperfeição geométrica. Ela representa um desvio na retidão do eixo de um elemento estrutural, como uma viga ou uma coluna.

A presença da curvatura inicial tem implicações importantes no desempenho estrutural. Ela pode aumentar os deslocamentos transversais em um elemento estrutural e, ao mesmo tempo, reduzir a capacidade resistente à instabilidade. Isso significa que a estrutura pode ser mais suscetível a falhas relacionadas a fenômenos de instabilidade, como flambagem. A norma ABNT NBR 8800:2024 estabelece limites para a curvatura inicial, descritos como uma fração do comprimento do vão ( $L$ ), com o objetivo de garantir que imperfeições geométricas não comprometam o desempenho estrutural. Para imperfeições locais, por exemplo, a norma define um limite de curvatura longitudinal de  $L/1000$ . Já a EN 1993-1-5 (2006) recomenda que se a imperfeição for local, utilizar  $d_g/200$  (em que  $d_g$  é a altura do perfil)

O SSRC (*Structural Stability Research Council*), baseado nos trabalhos realizados na literatura (BJORHOVDE *et al.*, 1972; BJORHOVDE, 1988), inicialmente recomendava um valor de curvatura inicial de  $L/1000$ . No entanto, definiu-se posteriormente que o valor ideal para perfis de uso prático seria  $L/1470$ .

Diversas investigações foram realizadas em vigas mistas alveolares considerando imperfeições geométricas, com relações entre a altura do perfil ( $d_g$ ) de  $1/100$  e  $1/200$  e o comprimento total ( $L$ ) de  $1/500$ ,  $1/1000$ ,  $1/1500$  e  $1/2000$  (FERREIRA; MARTINS, 2020; FERREIRA; MARTINS; DE NARDIN, 2021b; FERREIRA; ROSSI; MARTINS, 2019; ROSSI *et al.*, 2021a). Como resultado os autores concluíram que  $d_g/1000$  e  $L/500$  representaram melhor os valores experimentais. Os pesquisadores acreditam que isso aconteceu devido as instabilidades serem localizadas e não globais.

#### **2.4.4 Concrete Damage Plasticity (CDP)**

O modelo *Concrete Damage Plasticity* (CDP), é amplamente utilizado em simulações numéricas como no ABAQUS®. Este modelo descreve a degradação da rigidez do concreto, integrando conceitos da mecânica de danos acoplados à plasticidade, conforme descrito por Grassl e Jirásek (2006), Lubliner *et al.* (1989), e Lee e Fenves (1998). O modelo é baseado em três hipóteses principais: (1) a superfície inicial de falha, que indica o ponto em que começam as deformações permanentes, (2) a regra de fluxo, que define a intensidade das deformações permanentes volumétricas e desviadoras, e (3) a regra de *softening/hardening*, que descreve como a superfície de falha evolui com o tempo e a degradação do material.

Ao definir parâmetros como ângulo de dilatação ( $\psi$ ), excentricidade ( $\xi$ ), razões de resistência ( $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  e  $K_c$ ) e viscosidade ( $\mu$ ), o modelo simula o comportamento do concreto

sob compressão e tração. Em compressão, o concreto tende a falhar após o pico de resistência devido à propagação de microfissuras, enquanto em tração, ele é mais suscetível à fissuração. O modelo CDP também considera o *softening*, que representa a redução da resistência do concreto após atingir o pico de carga, e o *hardening*, que pode ocorrer em alguns casos, aumentando a resistência do material. Na literatura diversos valores de ângulo de dilatação foram testados, porém em relação aos outros parâmetros é adotado o valor indicado pelo Manual do ABAQUS (Tabela 2.2)

**Tabela 2.2:** Parâmetros do CDP na literatura

References	$\psi$ (°)	$\epsilon$	$fbc/fc$	$Kc$	$\mu$
Genikomsou e Polak (2015)	40	0.1	1.16	0.667	-
Alguhi (2016)	37	0.1	1.16	0.670	0.0005
Hussein e Amleh (2018)	39	0.1	1.16	0.667	-
Rossi <i>et al.</i> (2020, 2021b, 2021c)	36	0.1	1.16	0.667	0.0010
Ferreira <i>et al.</i> (2021b; 2021a)	40	0.1	1.16	0.667	0.0010
Zhu, Ding e Wang (2022)	30	0.1	1.16	0.667	0.0005
Chan, Moy e Galobardes (2022)	36	0.1	1.16	0.667	0.0005
Ge <i>et al.</i> (2023a; 2023b)	40 and 56	0.1	1.16	0.667	0.0005
Hosseini <i>et al.</i> (2023)	40	0.1	1.16	0.667	-
Sharaky, Seleem e Elamary (2023)	36	0.1	1.16	0.667	-
Zhong <i>et al.</i> (2023)	30	0.1	1.16	0.667	0.0005
Oliveira <i>et al.</i> (2022; 2024)	36	0.1	1.16	0.667	0.0010
Mahmud, Yang e Hassan (2013)	33	0.1	1.16	0.660	-

Fonte: Autor (2025)

# **3 MANUAIS E NORMAS PARA** **AVALIAÇÃO DA FMA**

Este capítulo apresenta os principais manuais e normas para a avaliação da capacidade resistente de vigas mistas alveolares, com ênfase na instabilidade do montante da alma, o modo de falha mais recorrente nesse tipo de viga. Serão discutidas as diretrizes técnicas e os critérios utilizados para analisar a resistência à instabilidade do montante, com o intuito de fornecer uma visão clara das práticas normativas e dos métodos.

### 3.1 WARD (1990)

A proposta apresentada por Ward (1990) é específico para perfis celulares de aço com seção transversal duplamente simétrico. Esse modelo é utilizado na *AISC Steel Design Guide 31* (FARES; COULSON; DINEHART, 2016), que sugere a avaliação da condição mais crítica entre as faces inferior e superior para seções assimétricas.

A abordagem do Ward (1990) teve como base uma série de ensaios conduzidos no *Steel Construction Institute* do Reino Unido, bem como estudos paramétricos derivados de simulações numéricas. É importante destacar que a aplicação do método é válida apenas para vigas que estejam dentro dos limites  $1,08 < P/D_o < 1,5$  e  $1,25 < d_g/D_o < 1,75$ .

A força cortante horizontal entre as aberturas  $i$  e  $i+1$  é calculada por meio da Equação 3.1.1 e o momento fletor, que retrata o escoamento na seção crítica gerado pela força cortante horizontal pela Equação 3.1.2.

$$V_h = \left| \frac{M_{(i+1)} - M_{(i)}}{d_{ef,comp}} \right| \quad \text{Equação 3.1.1}$$

$$M_{vh} = 0,9 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) V_h \quad \text{Equação 3.1.2}$$

Este modelo analítico considera três parâmetros em funções das propriedades geométricas do montante da alma, C1, C2 e C3 e a partir deles define-se a resistência a instabilidade no montante da alma e a resistência à força cortante horizontal pelas equações abaixo (Equação 3.1.3 - Equação 3.1.8):

$$C1 = 5,097 + 0,1464 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0,00174 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad \text{Equação 3.1.3}$$

$$C2 = 1,441 + 0,0625 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0,000683 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad \text{Equação 3.1.4}$$

$$C3 = 3,645 + 0,0853 \left( \frac{D_o}{t_w} \right) - 0,00108 \left( \frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad \text{Equação 3.1.5}$$

$$M_{W,e} = \frac{t_w(P - D_o + 0,564D_o)^2}{6} f_y \quad \text{Equação 3.1.6}$$

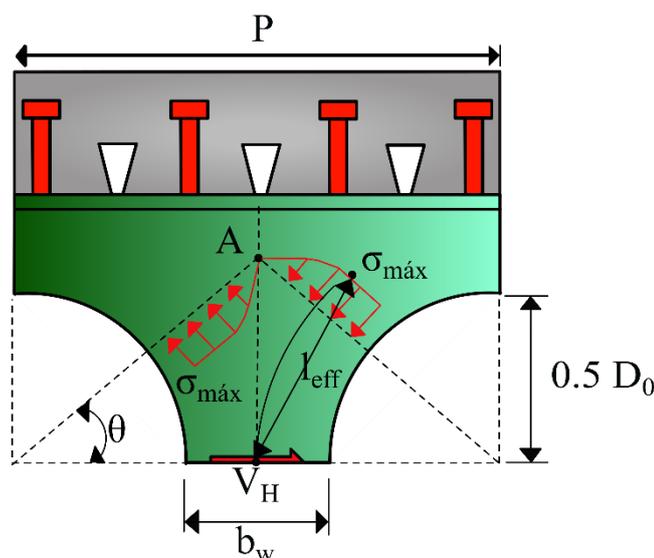
$$M_{W,R_k} = M_{W,e} \left[ C1 \left( \frac{P}{D_o} \right) - C2 \left( \frac{P}{D_o} \right)^2 - C3 \right] \quad \text{Equação 3.1.7}$$

$$V_{Wh,R_k} = \frac{M_{W,e}}{0,45D_o} \left[ C1 \left( \frac{P}{D_o} \right) - C2 \left( \frac{P}{D_o} \right)^2 - C3 \right] \quad \text{Equação 3.1.8}$$

### 3.2 LAWSON *et al.* (2006) E LAWSON E HICKS (2011) – SCI P355

A proposta realizada por Lawson et al. (2006) e Lawson e Hicks (2011), detalhada no *Steel Construction Institute* - SCI P355, se baseia na teoria de barras comprimidas, considerando um comprimento efetivo do montante de alma sujeito à compressão. A atuação de uma força cortante horizontal na metade da altura da alma resulta em tensões variáveis na abertura de tração e compressão devido à flexão entre os tirantes superior e inferior (Figura 3.1).

**Figura 3.1:** Modelo analítico de Lawson et al. (2006)



Fonte: adaptado de Lawson et al. (2006)

Através da Equação 3.2.1 é possível calcular o comprimento efetivo ( $l_{eff}$ ) o qual leva em conta a alteração das tensões ao redor da abertura:

$$l_{eff} = 0,5 \sqrt{b_w^2 + D_o^2} \leq 0,7D_o \quad \text{Equação 3.2.1}$$

Baseado no EN 1993-1-1:2005, a teoria das barras submetidas à compressão é aplicada considerando a esbeltez da alma e utilizando a curva de resistência.

$$\lambda_w = \frac{l_{eff} \sqrt{12}}{t_w} \quad \text{Equação 3.2.2}$$

$$f_{cr,w} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_w^2} \quad \text{Equação 3.2.3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,w}}} \quad \text{Equação 3.2.4}$$

$$\phi = 0,5 [1 + 0,49(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad \text{Equação 3.2.5}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \text{Equação 3.2.6}$$

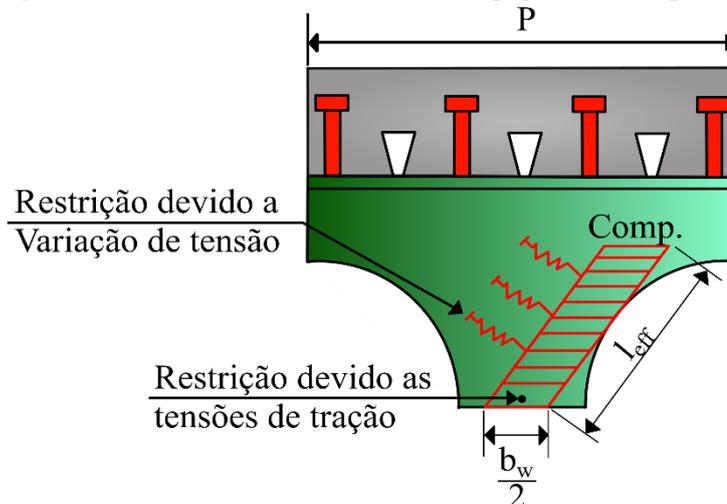
$$\sigma_{Rk} = \chi f_y \quad \text{Equação 3.2.7}$$

$$V_{Lv,Rk} = \sigma_{Rk} b_w t_w \quad \text{Equação 3.2.8}$$

### 3.3 PANEDPOJAMAN, THEPCHATRI e LIMKATANYU (2014)

A proposta desse modelo é uma adaptação no comprimento efetivo do montante de alma apresentado no SCI P355 (LAWSON *et al.*, 2006; LAWSON; HICKS, 2011a). O método, originalmente desenvolvido para seções com dupla simetria, pode ser estendido a seções assimétricas mediante a identificação da seção mais crítica entre os segmentos superior e inferior. No modelo desses autores, ocorre a multiplicação do comprimento efetivo do montante de alma por um fator k. Esse fator leva em consideração a restrição parcial do montante de alma, associada ao fenômeno de instabilidade, conforme exemplificado na Figura 3.2.

**Figura 3.2:** Modelo analítico de Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014)



Fonte: Modelo analítico de Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014)

O coeficiente k, leva em consideração o efeito da variação na altura das vigas em relação aos valores das razões  $D_o/d$  e  $P/D_o$ .

$$k = 0,9 \left( \frac{P}{D_o} \right) \left( \frac{D_o}{d} \right)^2 \leq \min \left( 1,15 \frac{D_o}{d}; 1,15 \right) \quad \text{Equação 3.3.1}$$

$$l_{eff} = k \left( 0,5 \sqrt{P^2 - D_o^2} \right) \quad \text{Equação 3.3.2}$$

### 3.4 GRILO *et al.* (2018)

A abordagem baseia-se em testes de laboratório, análise numérica e modelos desenvolvidos no software ABAQUS. Utilizando 597 casos processados, a nova formulação é derivada a partir de curvas de resistência. GRILO *et al.* (2018) formulou uma proposta que se fundamenta em um fator de redução expressa nas Equação 3.4.1 à Equação 3.4.5 e pela Tabela 3.1. Ressalta-se que esse modelo também é aplicável apenas em um limite de  $1,10 \leq P/D_o \leq 1,50$  E  $1,25 \leq d_g/D_o \leq 2,0$ .

$$y_p = \frac{D_o}{2} \left[ 0,445 \left( \frac{P}{D_o} \right)^3 - 2,578 \left( \frac{P}{D_o} \right)^2 + 4,770 \left( \frac{P}{D_o} \right) - 2,47 \right] \quad \text{Equação 3.4.1}$$

$$b_p = b_w \sqrt{1 - \frac{4y_p^2}{D_o^2}} \quad \text{Equação 3.4.2}$$

$$\lambda_{ma,0} = \sqrt{\frac{3(P^2 - D_o^2)f_y}{\pi^2 t_w^2 E}} \quad \text{Equação 3.4.3}$$

$$\chi = \frac{m}{\lambda_{ma,0}^n} \leq 1,0 \text{ para } \lambda_{ma,0} \geq 1,0 \quad \text{Equação 3.4.4}$$

$$\chi = op^{\lambda_{ma,0}^q} \leq 1,0 \text{ para } \lambda_{ma,0} \geq 1,0 \quad \text{Equação 3.4.5}$$

Na definição da força cortante de plastificação as Equação 3.4.6 -Equação 3.4.8 são usadas. Através do fator de redução e a força cortante de plastificação a resistência à cortante é mensurada pela Equação 3.4.8.

**Tabela 3.1:** Valores de m, n, o, p e q para o modelo de Grilo et al. (2018)

$D_o/d_g$	$p/D_o$	$m$	$n$	$o$	$p$	$q$
0,5	1,1	0,759	1,35	1,15	0,660	3,5
	1,2	0,730	1,39	1,42	0,514	2,1
	1,3	0,780	1,40	1,16	0,672	3,5
	1,4	0,840	1,42	1,26	0,667	2,7
	1,5	0,916	1,40	1,09	0,840	5,0
0,6	1,1	0,798	1,42	1,14	0,700	3,5
	1,2	0,791	1,42	1,13	0,700	3,8
	1,3	0,836	1,40	1,10	0,760	4,5
	1,4	0,909	1,36	1,15	0,790	3,3
	1,5	0,970	1,31	1,09	0,890	4,5
0,7	1,1	0,849	1,47	1,08	0,786	4,5
	1,2	0,844	1,44	1,11	0,760	3,9
	1,3	0,903	1,39	1,15	0,785	4,0
	1,4	0,980	1,34	1,12	0,870	3,0
	1,5	1,130	1,33	-	-	-
0,8	1,1	0,888	1,46	1,09	0,815	4,0
	1,2	0,901	1,42	1,14	0,790	3,5
	1,3	1,020	1,42	-	-	-
	1,4	1,175	1,42	-	-	-
	1,5	1,285	1,36	-	-	-

Fonte: adaptado de GRILO et al. (2018)

$$\beta_G = 1,838 - 0,42 \left( \frac{D_o}{d_g} \right) - \left( \frac{P}{3D_o} \right) \text{ para } \frac{P}{D_o} \geq 1,2 \quad \text{Equação 3.4.6}$$

$$V_{h,p} = \beta_G f_y \frac{t_w b_p^2}{\sqrt{3b_p^2 + 16y_p^2}} \quad \text{Equação 3.4.7}$$

$$V_{GH,Rk} = V_{h,p} \chi \quad \text{Equação 3.4.8}$$

### 3.5 EUROCODE 3 – Part 1-13: Beams with large web opening

A Eurocode 3 foi recentemente atualizada com a inclusão da Parte 1-13, que é dedicada exclusivamente a vigas com grandes aberturas na alma. Esta seção da norma introduz métodos para a avaliação da resistência de vigas à FMA, utilizando as Equação 3.5.1- Equação 3.5.6.

$$N_{wp,Ed} = V_{wp,Ed} \quad \text{Equação 3.5.1}$$

$$N_{wp,Ed} = \chi_{wp} b_w \min\{t_{w,tT} f_{y,tT}; t_{w,bT} f_{y,bT}\} \quad \text{Equação 3.5.2}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \rightarrow \chi \leq 1 \quad \text{Equação 3.5.3}$$

$$\Phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad \text{Equação 3.5.4}$$

$$\bar{\lambda}_{wp} = \frac{1,75 \sqrt{S_o^2 + h_o^2}}{t_w} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ porém } \bar{\lambda}_{wp} \leq \frac{2,7 h_o}{t_w} \frac{1}{\lambda_1} \text{ (Celular)} \quad \text{Equação 3.5.5}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{Equação 3.5.6}$$

# **4 CARACTERIZAÇÃO DO** **CONCRETO**

Para caracterizar o concreto de alto desempenho com agregado reciclado de louças sanitárias, foram preparados 18 cilindros de amostra com dimensões de 10x20 cm. Desses, 6 foram utilizados em ensaios de compressão, 6 em ensaios de tração e os outros 6 para determinar o módulo de elasticidade.

### 4.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

O concreto utilizado nos ensaios experimentais foi composto por Cimento Portland Composto com pozolana (CP II-Z-32), filer calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), sílica ativa ( $\text{SiO}_2$ ), areia fina com massa específica de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ , agregado graúdo com tamanho máximo de 9,5 mm (pedrisco ou brita 0) e massa específica de  $2,94 \text{ g/cm}^3$ , aditivo superplastificante redutor de água (ADVA Cast 540), água potável e agregado reciclado proveniente de louças sanitárias.

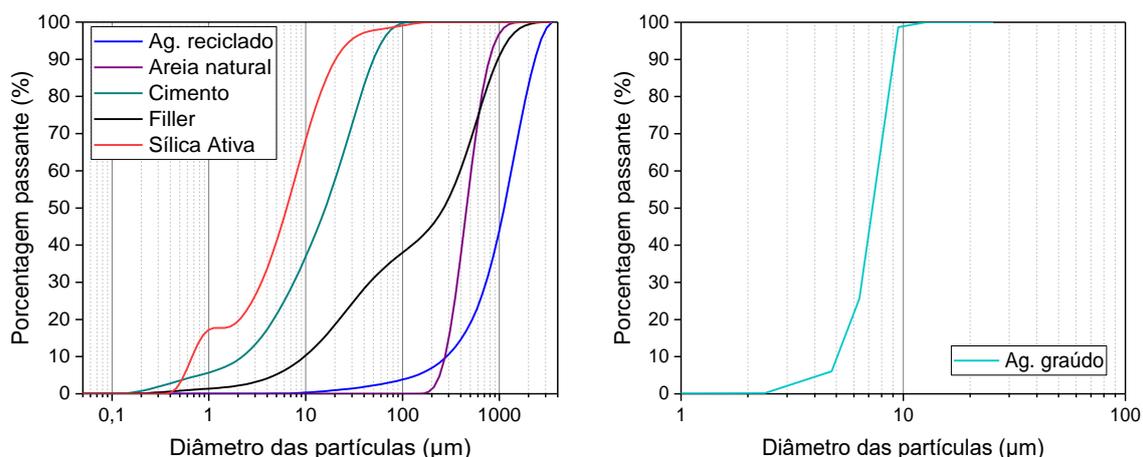
A avaliação dos agregados finos foi realizada utilizando a técnica de difração a laser, enquanto a dos agregados graúdos seguiu as diretrizes da ABNT NBR 17054:2022. Após o peneiramento, os agregados reciclados mostraram uma variação significativa no tamanho de suas partículas, como evidenciado na Figura 4.1. As curvas granulométricas obtidas estão ilustradas na Figura 4.2.

**Figura 4.1:** Peneiramento do Agregado reciclado



*Fonte: Autor (2025)*

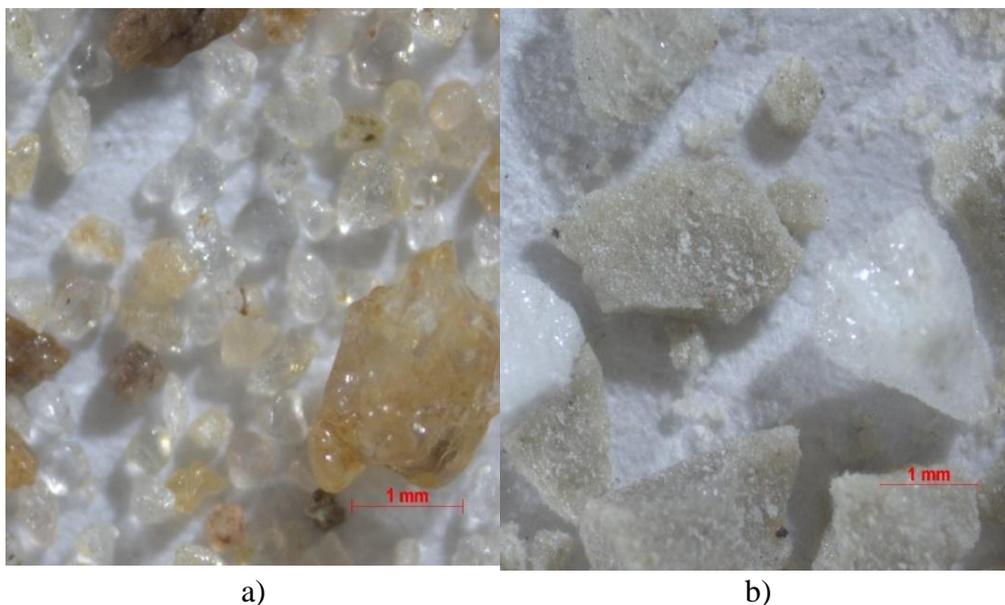
**Figura 4.2:** Curvas granulométricas: materiais finos e agregado graúdo



Fonte: Autor (2024)

Para viabilizar a substituição do agregado fino natural pelo reciclado no concreto, o material foi processado com a peneira nº 12 (1,68 mm). Além disso, foi realizada uma análise por microscopia na areia fina e no agregado reciclado para comparar os tamanhos entre eles (Figura 4.3).

**Figura 4.3:** a) areia fina; b) agregado reciclado



Fonte: Autor (2024)

A composição química do agregado foi determinada pela realização de ensaios de fluorescência de raios X, realizados no Instituto Senai de Inovação de Maringá. A Tabela 4.1 mostra o resultado médio das amostras ensaiadas. O principal componente relatado é o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Tabela 4.1:** Composição química do agregado reciclado

Composto Químico	Porcentagem [%]
$\text{SiO}_2$	66,56
$\text{Al}_2\text{O}_3$	24,74
$\text{K}_2\text{O}$	3,22
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,87
$\text{CaO}$	1,40
$\text{TiO}_2$	0,69
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,23
$\text{ZrO}_2$	0,58
Outros	0,71

*Fonte: Autor (2024)*

O traço foi baseado no trabalho realizado por Benedetty *et al.* (2023) o qual usou o concreto autoadensável, produzindo uma resistência a compressão de aproximadamente 90 MPa. Algumas alterações foram feitas chegando ao traço da Tabela 4.2.

Com base no estudo realizado por Prates *et al.* (2024), a substituição de 50% de agregados finos por agregado reciclado de louças sanitária proporciona uma similaridade significativa com o concreto de agregado comum. Desta forma, essa foi a porcentagem escolhida para substituir areia natural.

**Tabela 4.2:** Proporção do concreto estudado

Material	Quantidades [ $\text{kg/m}^3$ ]
Cimento	418,24
Sílica Ativa	30,00
Filer Calcáreo	150,00
Areia	391,50
Areia Reciclada	391,50
Brita 0	785,00
Superplastificante	5,86*
Água	184,03

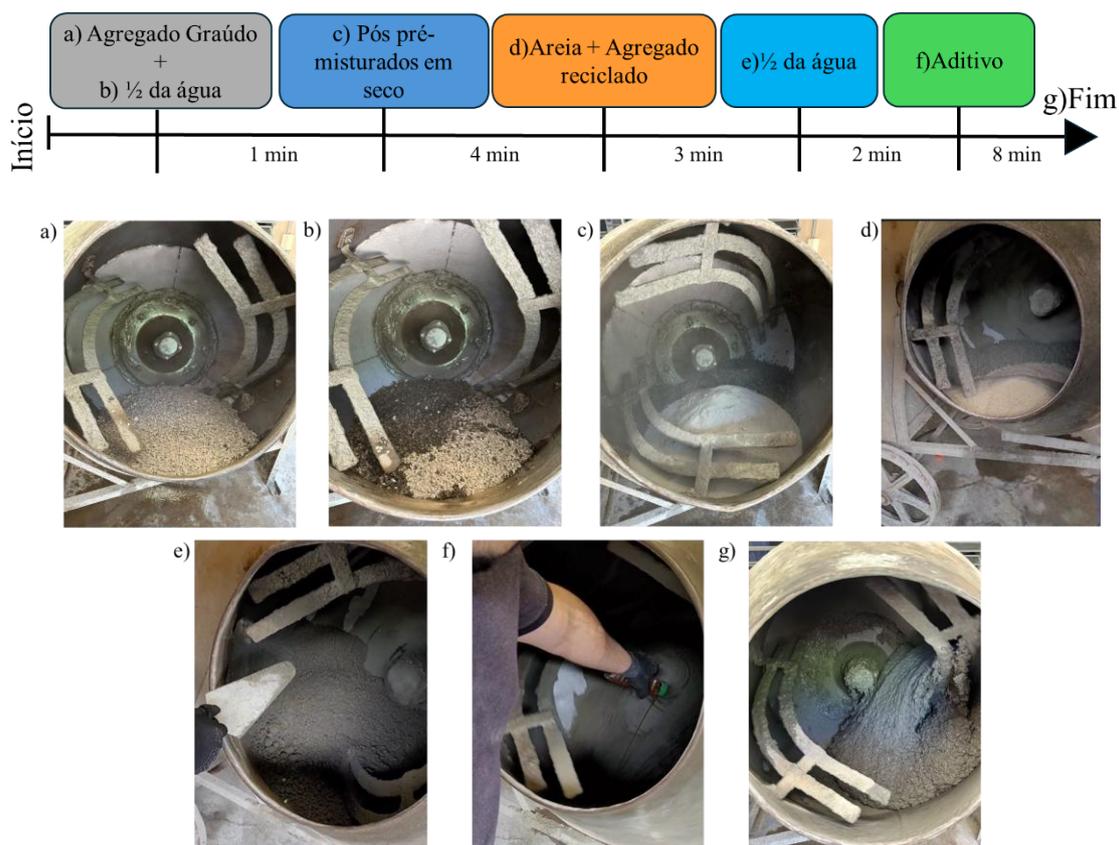
\*Corresponde a 1,4% do peso do cimento

*Fonte: Autor (2024)*

## 4.2 MISTURA E LANÇAMENTO

A fabricação do concreto foi realizada através de uma betoneira de eixo inclinado e o procedimento de mistura seguiu a ordem de brita, metade da água, materiais finos (cimento, sílica ativa e filer calcáreo), areia, agregado reciclado, metade da água e aditivo. Na Figura 4.4 foi retratado o fluxograma da adição dos materiais.

**Figura 4.4:** Fluxograma dos materiais adicionados na concretagem

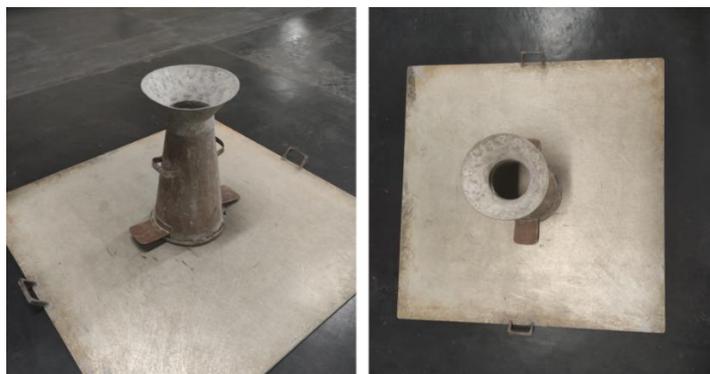


Fonte: Autor (2025)

### 4.3 ESTADO FRESCO DO CONCRETO

A caracterização do estado fresco do concreto foi realizada pelo cone de Abrams (Figura 4.5) seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 15823-2:2017 para o teste de *Slump Flow*.

**Figura 4.5:** Cone de Abrams

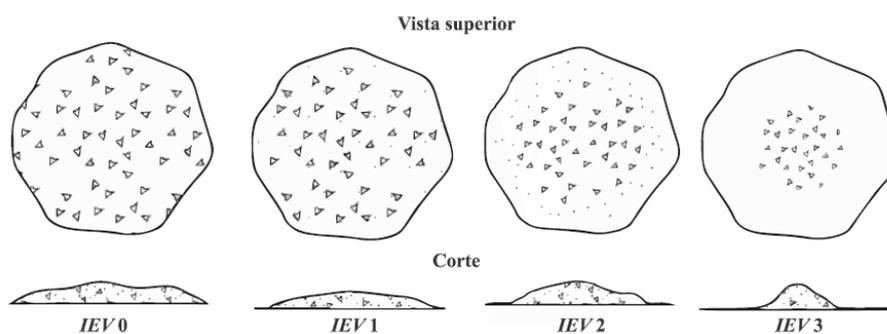


Fonte: Autor (2025)

A Norma ABNT NBR 15823-1:2017 classifica o concreto pelo Cone de Abrams por meio de três parâmetros: o espalhamento (SF – mm), o tempo de escoamento para

500 mm percorridos ( $t_{500} - s$ ) e o Índice de estabilidade visual (IEV). Para conduzir o teste, inicialmente o cone é colocado sobre uma superfície plana e horizontal com uma marcação diametral de 500 mm. Em seguida, o cone é preenchido com o concreto despejado de uma só vez. Ao levantar lentamente o cone, começa-se a contar o tempo que o concreto irá se esparramar. Ao alcançar a marcação diametral de 500 mm obtém o tempo  $t_{500}$ , ao parar de espalhar o concreto obtém o valor do espalhamento SF. Agora o índice de estabilidade visual (IEV) é realmente comparado visualmente de acordo com os modelos da Figura 4.6.

**Figura 4.6:** Classes do IEV



Fonte: adaptada da norma ABNT NBR 15823-2:2017

Com o tempo, a classe do IEV e espalhamento a norma apresenta as seguintes classificações:

**Tabela 4.3:** Classes para os resultados do ensaio do Slump Flow

SF(mm)	550 a 650	SF1
	660 a 750	SF2
	760 a 850	SF3
$t_{500}(s)$	$\leq 2$	VS 1
	$> 2$	VS 2
IEV	Altamente Estável	IEV 0
	Estável	IEV 1
	Instável	IEV 2
	Altamente Instável	IEV 3

Fonte: adaptada da norma ABNT NBR 15823-2:2017

)

### 4.4 ESTADO ENDURECIDO DO CONCRETO

Após os 28 dias de cura do concreto, procedeu-se à avaliação de suas propriedades no estado endurecido. Um ensaio crucial foi conduzido utilizando corpos de prova cilíndricos, medindo 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, com o objetivo de determinar tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade. Para garantir um contato eficiente e evitar interferências no ensaio, as superfícies superior e inferior do corpo de prova foram retificadas. O teste de resistência a compressão seguiu as diretrizes da norma ABNT NBR 5739:2022, enquanto o ensaio do módulo de elasticidade foi conduzido conforme a norma ABNT NBR 8522:2017

Em relação à tração, realizou-se um ensaio por meio da compressão diametral ( $f_{t,spm}$ ) em seis corpos cilíndricos também com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A norma para esse ensaio foi a ABNT NBR 7222:2011 e esta afirma que a resistência média à tração da matriz de concreto equivale a 90% da resistência obtida no ensaio de tração direta ( $f_{tm} = 0,9f_{tm,sp}$ ). Nas figuras abaixo é possível ver o ensaio para o teste de compressão, módulo de elasticidade e tração.

# **5 MODELAGEM NUMÉRICA**

### 5.1 O MODELO NUMÉRICO

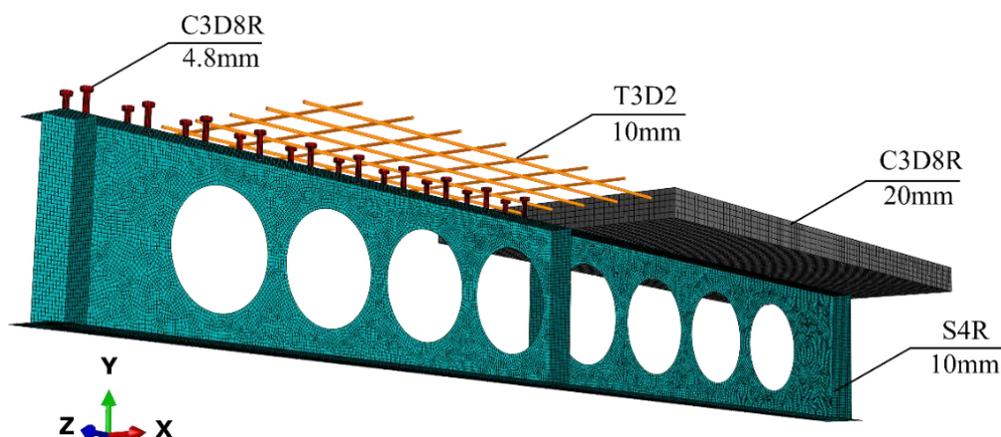
A análise numérica foi realizada utilizando o software ABAQUS® (DASSAULT SYSTÈMES, 2023), que oferece diversas funções e métodos para investigar comportamentos estruturais. Com base em estudos anteriores (DE OLIVEIRA *et al.*, 2023, 2024; FERREIRA *et al.*, 2021b; FERREIRA; ROSSI; MARTINS, 2019; HOSSEINPOUR *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022; ROSSI *et al.*, 2020a, 2020c, 2020b, 2021c; WIJESIRI PATHIRANA *et al.*, 2016), foram definidas análises de flambagem elástica e pós-flambagem para investigar o comportamento da estrutura.

A análise de flambagem elástica foi desenvolvida utilizando o método de perturbação linear (*buckle linear perturbation*), no qual a carga crítica é determinada por meio da obtenção de autovalores e autovetores. Já na análise pós-flambagem, foram consideradas imperfeições geométricas iniciais, e a não linearidade geométrica foi solucionada pelo método *Newton-Raphson*, uma técnica iterativa robusta capaz de lidar eficientemente com grandes deformações, não linearidade dos materiais e condições de contato complexas.

#### 5.1.1 Geometria, elemento finito e malha

Os modelos analisados foram compostos por um perfil I metálico (celular ou cheio), uma laje de concreto, armaduras de reforço, conectores do tipo pino com cabeça. Como visto no subcapítulo 2.4.1 as lajes de concreto e os conectores usam elementos sólidos hexaédricos lineares de oito nós com integração reduzida e controle *hourglass* (C3D8R). No perfil I metálico usa o elemento de casca (*shell*) quadrilateral S4R com quatro nós e integração reduzida. As armaduras de reforços usam elementos de treliça, lineares, tridimensionais e com dois nós (T3D2).

Com base em estudos da literatura, foram definidos os tamanhos de malha para cada elemento do modelo (Figura 5.1). Para a laje, foi adotado um tamanho de malha de 20 mm (DE OLIVEIRA *et al.*, 2023, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2022). No caso da viga I, a malha foi definida em 10 mm (FERREIRA; ROSSI; MARTINS, 2019; ROSSI *et al.*, 2020a, 2020b). Os conectores de cisalhamento foram modelados com uma malha de 4,8 mm (FERREIRA *et al.*, 2021b), enquanto as barras de reforço utilizaram uma malha de 10 mm (DE OLIVEIRA *et al.*, 2023, 2024; HOSSEINPOUR *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022; ROSSI *et al.*, 2020c, 2021c).

**Figura 5.1:** Tipos de elementos finitos e tamanhos das malhas

Fonte: Autor (2025)

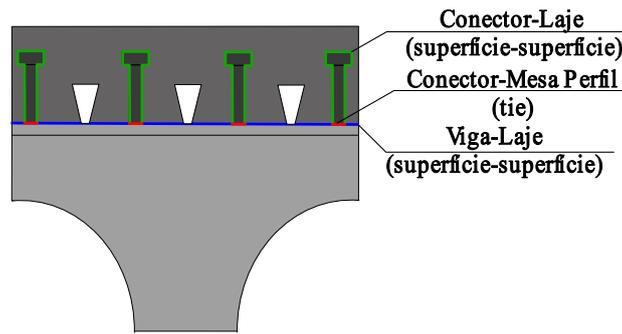
### 5.1.2 Interação entre os materiais

A interação realizada nos elementos do modelo numérico envolveu o uso das funcionalidades “*Interaction*” e “*Constraint*”, disponíveis na biblioteca de comandos do ABAQUS®. Para a conexão entre os conectores e o perfil I, optou-se pela interação “*Tie Constraint*”, simbolizando a união como uma solda virtual para evitar qualquer deslocamento indesejado. Em relação às interfaces entre as superfícies da laje de concreto e o perfil de aço, bem como entre o conector e a laje de concreto, foi empregada a opção “*Surface to Surface Interaction*”.

É importante destacar que, para definir o comportamento normal e tangencial entre essas superfícies, foram utilizados os comandos “*Hard Contact*” e “*Penalty*”, respectivamente. Adotou-se o valor recomendado por Wijesiri Pathirana *et al.*, (2016), estabelecendo o coeficiente de atrito em 0,4.

No caso das barras de armadura longitudinal, transversal e a laje de concreto a ligação foi realizada pelo método de elementos embebidos, em que a ligação é considerada perfeitamente entre elementos incorporados (*embedded elements*) e seus elementos hospedeiros (*host region*). Essa conexão evita deslizamento entre as armaduras e o concreto além de impedir os graus de liberdade translacional dos nós incorporados. Por fim, a interação da laje de concreto e do perfil I com seus atuadores foi do tipo “*Tie constrain*”. Na Figura 5.2 foi ilustrado cada uma das interações para melhor compreensão da configuração dos modelos.

**Figura 5.2:** Contato entre os elementos



Fonte: Autor (2025)

### 5.1.3 Modelos Constitutivos

O modelo constitutivo adotado para representar a viga metálica foi o modelo quadrilinear de Yun e Gardner (2017) (Figura 5.3 a)), descrito pela Equação 5.1.1 - Equação 5.1.5. Para as armaduras transversais e longitudinais, foi utilizado o modelo elastoplástico com encruamento linear positivo (Figura 5.3 b)), enquanto para os conectores de cisalhamento optou-se pelo modelo elastoplástico perfeito (Figura 5.3 c)).

$$f(\varepsilon) \begin{cases} E\varepsilon, \text{ for } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y, \text{ for } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh}(\varepsilon - \varepsilon_{sh}), \text{ for } \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1\varepsilon_u \\ f_{C_1\varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1\varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1\varepsilon_u}(\varepsilon - C_1\varepsilon_u), \text{ for } C_1\varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad \text{Equação 5.1.1}$$

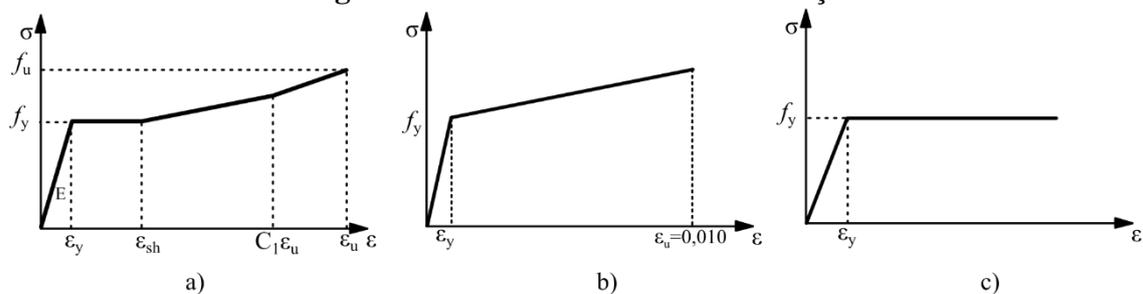
$$\varepsilon_u = 0.6 \left( 1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \rightarrow \varepsilon_u \geq 0.06 \quad \text{Equação 5.1.2}$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.055 \rightarrow 0.015 < \varepsilon_{sh} \leq 0.06 \quad \text{Equação 5.1.3}$$

$$K_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u} \quad \text{Equação 5.1.4}$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})} \quad \text{Equação 5.1.5}$$

**Figura 5.3:** Modelos constitutivos do aço



Fonte: Autor (2025)

No caso do concreto, o módulo de elasticidade ( $E_i$ ), a resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) e à tração ( $f_{tm}$ ) (Equação 5.1.6 à Equação 5.1.8) foram determinados com base nas recomendações da EN 1992-1-1 (2004). Já as deformações últimas seguiram as orientações da FIB (2010) (Tabela 5.1).

$$E_i = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \text{ MPa} \quad \text{Equação 5.1.6}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad \text{Equação 5.1.7}$$

$$f_{tm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad \text{Equação 5.1.8}$$

**Tabela 5.1:** Deformação última a partir da resistência última a compressão

Concreto	C12	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
$E_{ci}$ [Gpa]	27,1	30,3	33,6	36,3	38,6	40,7	42,6	44,4	46,0	47,5	48,9	50,3
$E_{c1}$ [Gpa]	11,1	13,3	16,5	20,0	23,2	26,2	28,9	31,4	33,8	36,0	39,3	42,7
$\varepsilon_{c1}$ [‰]	-1,8	-2,1	-2,3	-2,4	-2,5	-2,6	-2,7	-2,8	-2,9	-3,0	-3,0	-3,0
$\varepsilon_{c.lim}$ [‰]	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,4	-3,3	-3,2	-3,1	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
k	2,4	2,3	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2

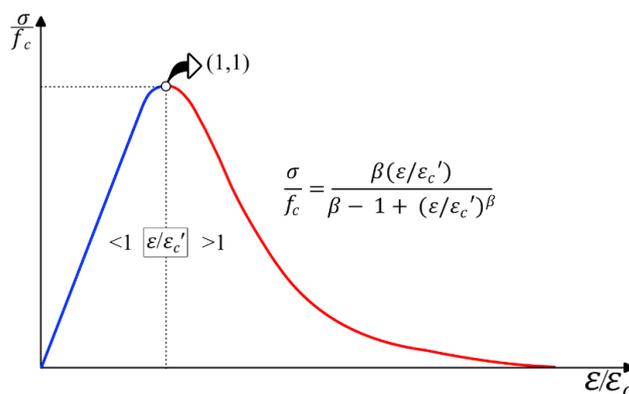
Fonte: adaptado da FIB (2010)

Para reproduzir o comportamento à compressão, adotou-se o modelo de Carreira e Chu (1985) dado pelas seguintes equações:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{\beta(\varepsilon/\varepsilon_c')}{\beta - 1 + (\varepsilon/\varepsilon_c')^\beta} \quad \text{Equação 5.1.9}$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_c'}{\varepsilon_c' E_i}} \quad \text{Equação 5.1.10}$$

**Figura 5.4:** Carreira & Chu (1995) para concreto submetido a compressão



Fonte: Autor (2025)

Para o comportamento da tração foram utilizados os modelos de Hordijk (1992) (Figura 5.5 / Equação 5.1.11 - Equação 5.1.14) para representar o concreto comum e de alta resistência. Já para simular o concreto com fibras foi definido o modelo de Li e Leung (1992) (Figura 5.6 / Equação 5.1.15 - Equação 5.1.20). O modelo de fibras foi utilizado porque um dos modelos experimentais adotou esse tipo de concreto. No entanto, nesta validação, o foco não foi validar o concreto, mas sim o comportamento do aço de alta resistência.

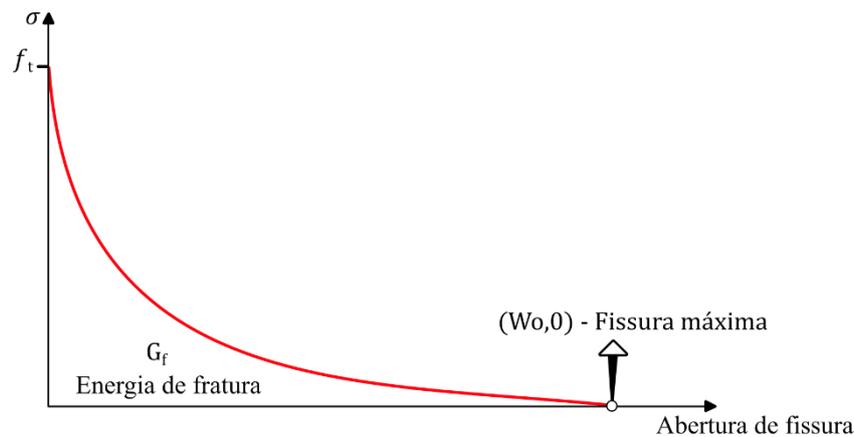
$$G_f = 73 f_{cm}^{0,18} \quad \text{Equação 5.1.11}$$

$$w_c = \frac{5,14 G_f}{f_t} \quad \text{Equação 5.1.12}$$

$$f(w) = \left[ 1 + \left( \frac{c_1 w}{w_c} \right)^3 \right] \exp \left( - \frac{c_2 w}{w_c} \right) \text{ sendo } c_1 = 3,0 \text{ e } c_2 = 6,93 \quad \text{Equação 5.1.13}$$

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = f(w) - \frac{w}{w_c} f(w_c) \quad \text{Equação 5.1.14}$$

**Figura 5.5:** Modelo de Hordijk na tração



Fonte: adaptado de Hordijk (1992)

$$\sigma_f(w) = \begin{cases} \sigma_{f0} \left( 2 \sqrt{\frac{w}{w_0} - \frac{w}{w_0}} \right)^2 & \text{Para } w \leq w_0 \\ \sigma_{f0} \left( 1 - \frac{4w}{L_f} \right)^2 & \text{Para } w \geq w_0 \end{cases} \quad \text{Equação 5.1.15}$$

$$\sigma_m(w) = f_t \cdot \exp \left( -2 \frac{f_t \cdot w}{G_f} \right) \quad \text{Equação 5.1.16}$$

$$\sigma_{f0} = \eta \cdot \frac{L_f}{d_f} \cdot L_f \cdot \tau_{eq} \quad \text{Equação 5.1.17}$$

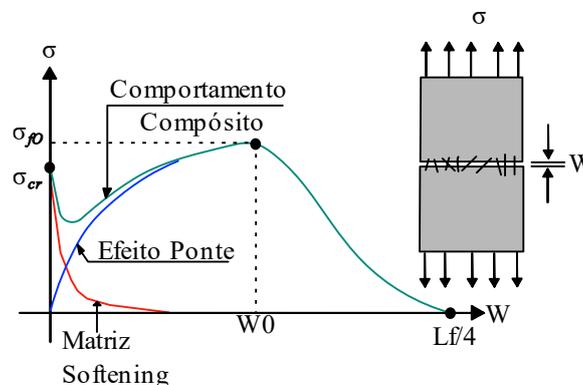
$$\tau_{eq} = 1,5 \cdot \sqrt{f_{cm}} \quad \text{Equação 5.1.18}$$

$$w_0 = \frac{\tau_{eq} \cdot L_f^2}{E_f \cdot d_f} \quad \text{Equação 5.1.19}$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{c \text{ máx}}} \quad \text{Equação 5.1.20}$$

No que diz respeito ao dano à tração de concretos com fibra, Mobasher (2011) destaca que, mesmo na presença de fissuração, ocorre a transferência de esforços devido ao efeito ponte das fibras. Nesse contexto, o parâmetro de dano em tração é considerado igual a zero.

**Figura 5.6:** Comportamento do compósito reforçado com fibras



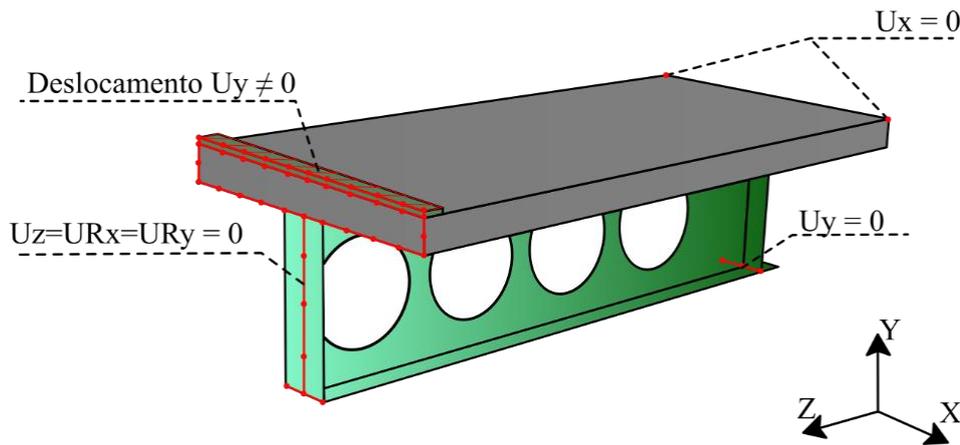
Fonte: adaptado de Benedito (2023)

#### 5.1.4 Condições de contorno

A calibração foi validada utilizando vigas mistas em condição de apoio simples, exigindo três principais restrições e um deslocamento (Figura 5.7). O eixo y foi fixado ( $U_y=0$ ) para impedir o deslocamento vertical, uma restrição lateral ( $U_x=0$ ) foi aplicada para simular contenções laterais, e um deslocamento foi imposto por meio de uma placa indeformável sobre a laje para representar uma carga concentrada.

A simetria foi utilizada para reduzir o tempo computacional, com restrições nos deslocamentos e rotações normais ao plano de simetria ( $U_z=0$ ,  $U_{R_x}=0$ ,  $U_{R_y}=0$ ). Essas restrições, respaldadas por pesquisas anteriores (DAI *et al.*, 2023; FERREIRA *et al.*, 2021b; FERREIRA; MARTINS; DE NARDIN, 2021a; MAO *et al.*, 2024), mostraram-se adequadas para a simulação de vigas simplesmente apoiadas em análises numéricas.

**Figura 5.7:** Condições de contorno



Fonte: Autor (2025)

## 5.2 FORÇA CORTANTE HORIZONTAL DO ELEMENTO FINITO

Nesta pesquisa foram realizadas duas formas de extrair os dados numéricos do ABAQUS em relação a força cortante horizontal. O primeiro método é baseado na *AISC Steel Design Guide 31* (2016), e o segundo método é a extração diretamente do ABAQUS.

### 5.2.1 AISC Steel Design Guide 31 (SD31)

A força de cisalhamento horizontal foi determinada a partir da diferença de momento baseada na carga última calculada no ABAQUS. Esse momento foi dividido pelo comprimento efetivo, que corresponde à distância entre o centroide da aba inferior e o centroide da laje de concreto (Equação 5.2.1 - Equação 5.2.4). A força calculada foi, então, comparada para cada alma intermediária a fim de identificar a mais crítica para comparação com os modelos analíticos. Este método também é utilizado por Ferreira, Martins e Nardin (2020) para comparar o resultado analítico com o numérico.

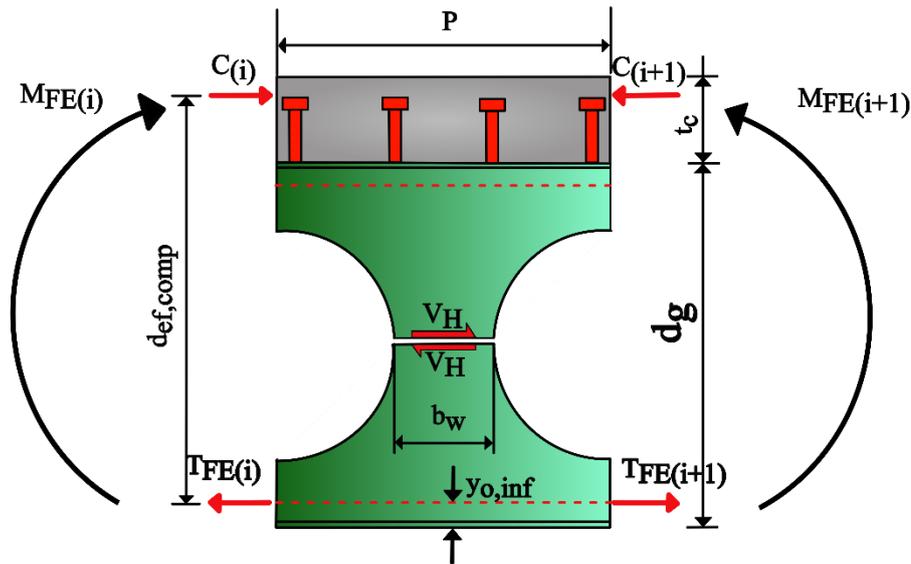
$$V_{h,FE} = \left| \frac{M_{FE(i+1)} - M_{FE(i)}}{d_{ef,comp}} \right| \quad \text{Equação 5.2.1}$$

$$d_{ef,comp(n)} = d_g - y_{o,inf} + 0.5t_c \quad \text{Equação 5.2.2}$$

$$X_c = \frac{\left( \frac{M_{FE}}{d_{ef,comp0}} \right)}{0.85 \cdot f_c \cdot b_{efec}} \quad \text{Equação 5.2.3}$$

$$d_{ef,comp(n+1)} = d_g - y_{o,inf} + t_c - \frac{X_c}{2} \quad \text{Equação 5.2.4}$$

**Figura 5.8:** Cisalhamento horizontal AISC Steel Design Guide 31 (SD31).

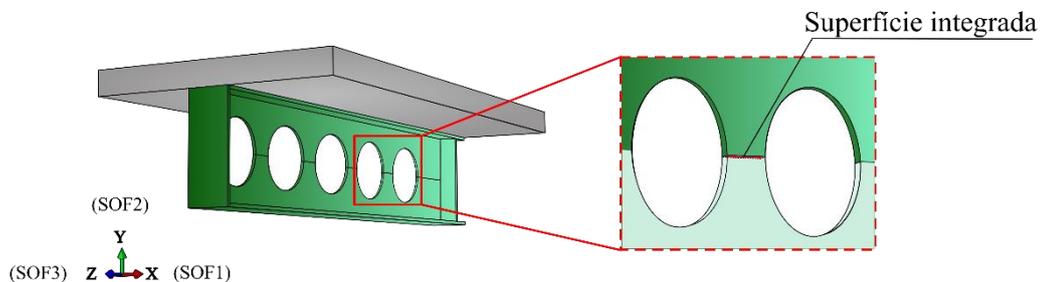


Fonte: Autor (2025)

### 5.2.2 Dados diretamente do ABAQUS

Para obter o valor de cisalhamento horizontal diretamente no ABAQUS, utiliza-se a função “*Integrated Output Section*”, que permite calcular e integrar dados ao longo de uma superfície específica (Figura 5.9). Inicialmente, define-se uma superfície horizontal localizada no centro da alma intermediária e a associa a um nome de seção para a extração de dados. Na configuração do pedido de saída integrada, utiliza-se a função “*Integrated Output Request*” e seleciona-se a opção “*Forces/Reaction - SOF, Total Force on the Surface*” para calcular a força total atuante nessa superfície. Embora o pedido inclua todas as direções de força (SOF1, SOF2, SOF3), o interesse principal está na direção 3 (SOF3), correspondente ao cisalhamento horizontal ao longo da alma intermediária, diretamente relacionado ao modo de falha.

**Figura 5.9:** “*Integrated Output Section*” método para obter a cortante horizontal ( $V_H$ )



Fonte: Autor (2025)

### 5.3 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Para assegurar a confiabilidade do modelo numérico desenvolvido neste estudo, sua validação foi realizada com base em resultados experimentais disponíveis na literatura. As propriedades físicas dos modelos experimentais, descritas na Tabela 5.2, permitem analisar o desempenho e o grau de resistência de cada elemento estrutural. Os modelos M1 e M2 (NADJAI *et al.*, 2007; VASSART, 2009) foram utilizados para avaliar o comportamento de vigas celulares, enquanto o modelo M3 (TONG *et al.*, 2022) investigou vigas mistas compostas por aço de alta resistência e lajes de UHPC. Por sua vez, os modelos M4 e M5 (MÜLLER *et al.*, 2006) analisaram o desempenho de vigas mistas celulares fabricadas com aço de alta resistência. A validação numérica baseou-se na comparação entre curvas de carga x deslocamento, nas cargas últimas obtidas e na correspondência visual entre os modelos numéricos e experimentais.

Para a avaliação das vigas mistas, os parâmetros do modelo CDP selecionados foram  $\psi = 36^\circ$ ,  $\epsilon = 0,1$ ,  $f_{bc}/f_c = 1,16$ ,  $K_c = 0,667$  e  $\mu = 0,001$ , pois esses valores representaram adequadamente o concreto em vigas mistas celulares (DE OLIVEIRA *et al.*, 2024; ROSSI *et al.*, 2020a, 2020c, 2020b, 2021b).

**Tabela 5.2:** Modelos validados

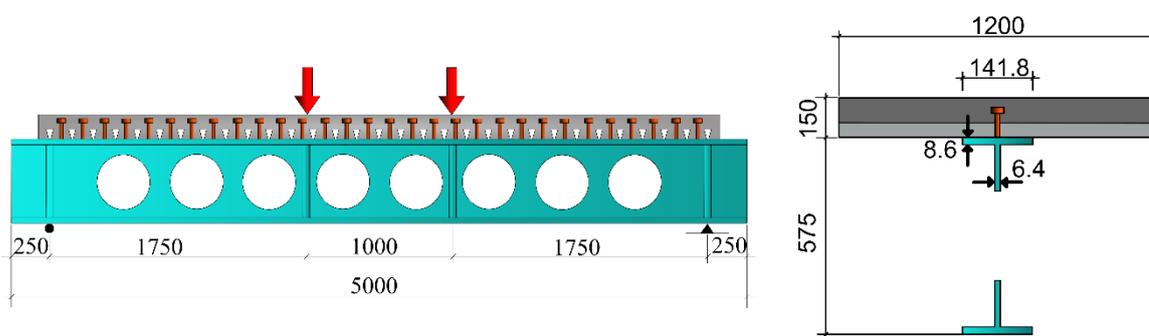
Modelos	Elementos	$E$ [Mpa]	$\nu$ [-]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$f_{ck-cubic}$ [MPa]
M1 e M2 (NADJAI <i>et al.</i> , 2007 e VASSART, 2009)	Laje de Concreto	41317.0	0.2	-	-	2.805	35.0
	Perfil I Celular	210000.0	0.3	355.0	470.0	-	-
	Armadura	200000.0	0.3	460.0	559.0	-	-
	Pino com cabeça	200000.0	0.3	460.0	559.0	-	-
M3 (TONG <i>et al.</i> , 2022)	Laje de Concreto	48300.0	0.2	-	-	9.000	131.1
	Mesa Perfil I	225000.0	0.3	794.0	889.0	-	-
	Mesa Perfil I	204000.0	0.3	777.0	870.0	-	-
	Armadura	185000.0	0.3	576.0	675.0	-	-
M4 (MÜLLER <i>et al.</i> , 2006)	Pino com cabeça	200000.0	0.3	375.0	458.0	-	-
	Laje de Concreto	31646.0	0.2	-	-	2.564	25.0
	Perfil Celular	195000.0	0.3	489.0	587.0	-	-
M5 (MÜLLER <i>et al.</i> , 2006)	Pino com cabeça	200000.0	0.3	460.0	559.0	-	-
	Laje de Concreto	31646.0	0.2	-	-	2.564	25.0
	Perfil I Celular (mesa inferior)	195000.0	0.3	488.0	582.0	-	-
	Perfil I Celular (alma inferior)	195000.0	0.3	453.0	519.0	-	-
	Perfil I Celular (mesa superior)	195000.0	0.3	467.0	558.0	-	-
	Perfil I Celular (alma superior)	195000.0	0.3	408.0	525.0	-	-
	Pino com cabeça	200000.0	0.3	460.0	559.0	-	-

Fonte: Autor (2025)

### 5.3.1 Modelos M1 e M2 (NADJAI *et al.*, 2007 e VASSART, 2009)

O modelo M1 corresponde a uma viga celular mista de aço e concreto, caracterizada por uma seção simétrica composta por um perfil UB457x152x52 mm em aço S355. A laje de concreto, com espessura total de 150 mm, inclui nervuras de 51 mm provenientes da forma de aço incorporada. Para garantir a interação entre os materiais, foram utilizados conectores de pino com cabeça, medindo 120 mm de comprimento e espaçados a cada 150 mm. A viga apresenta um vão de 4500 mm, sendo submetida a duas cargas concentradas, enquanto a laje é reforçada com uma malha soldada A142. Detalhes adicionais sobre as configurações podem ser observados na Figura 5.10.

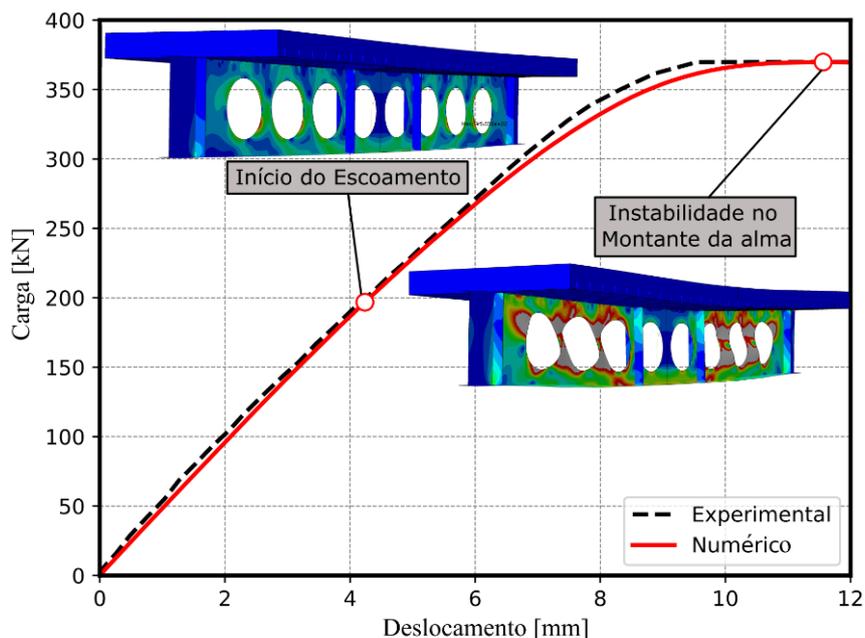
**Figura 5.10:** Geometria do modelo M1 (dimensões em mm)



Fonte: Autor (2025)

Ao simular o modelo, foi possível observar a falha por FMA. Conforme ilustrado na Figura 5.11, o escoamento do aço teve início nas regiões próximas às aberturas quando o deslocamento alcançou cerca de 4,5 mm sob uma carga de 196,81 kN. À medida que a carga aumentou para 369,42 kN e o deslocamento atingiu 11,57 mm, foi registrado um deslocamento lateral significativo no montante da alma, caracterizando o fenômeno de instabilidade. Esse comportamento foi seguido por uma queda na curva de carga, indicando perda de rigidez do sistema. Apesar de danos localizados, a laje de concreto permaneceu intacta, sem fissuras totais, sugerindo que ainda era capaz de suportar cargas adicionais, o que reforça que a falha esteve concentrada no perfil de aço.

**Figura 5.11:** Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M1

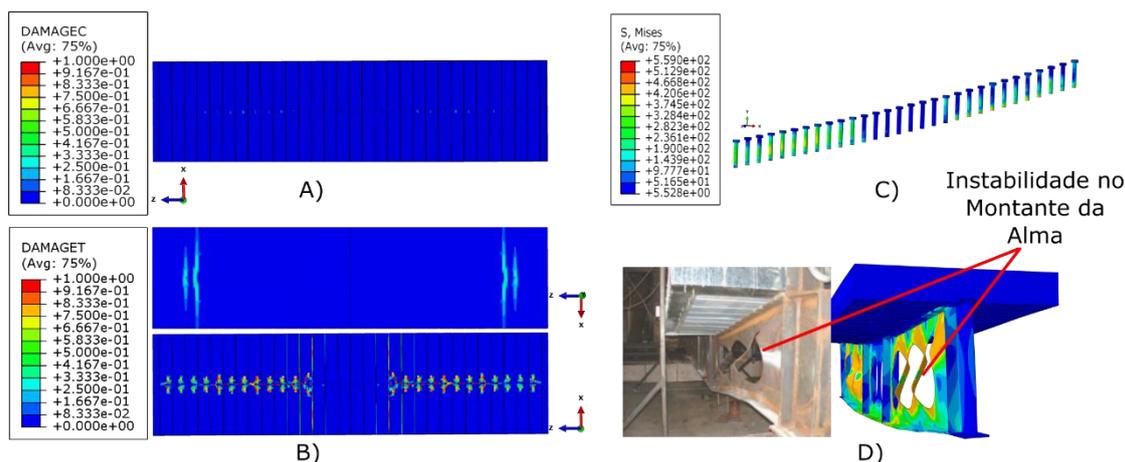


Fonte: Autor (2025)

Na Figura 5.12 A), observa-se o dano por compressão na parte inferior da laje de concreto do modelo M1. Embora esses efeitos estivessem presentes, eles mostraram que o concreto não atingiu o estado de esmagamento nem sofreu fissuras decorrentes da compressão. Mesmo na parte superior da laje, nenhum dano por compressão foi identificado. Quanto aos danos por tração (Figura 5.12 B)), constatou-se uma formação de fissuras na parte superior da laje, enquanto a zona inferior apresentou maior concentração de danos, particularmente nas regiões próximas à interface com o steel deck. Apesar da formação dessas fissuras, elas não comprometeram a integridade global da viga.

Verifica-se que os conectores operaram dentro de limites seguros de tensão, sem evidências de arrancamento (Figura 5.12 C)). Por fim, a Figura 5.12 D) apresenta uma comparação entre as falhas experimentais e numéricas, demonstrando uma semelhança entre os dois.

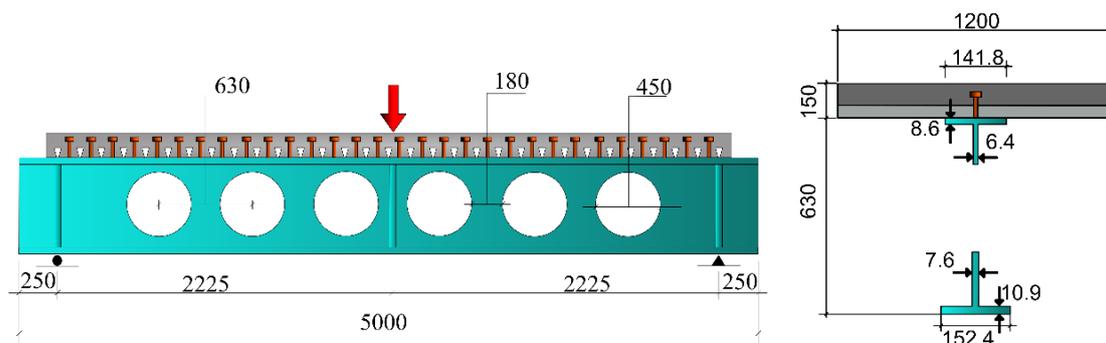
**Figura 5.12:** Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M1



Fonte: Autor (2025)

O modelo M2, também analisado por Nadjai *et al.* (2007) e Vassart (2009), é uma viga celular mista com seção assimétrica, composta por dois perfis metálicos em aço S355. O perfil inferior consiste em um UB457x152x52 mm, enquanto o perfil superior é um UB406x140x39 mm. A laje de concreto e os conectores utilizados mantêm as mesmas características descritas para o modelo M1. Informações adicionais sobre as configurações podem ser encontradas na Figura 5.13.

**Figura 5.13:** Geometria do modelo M2 (dimensões em mm)



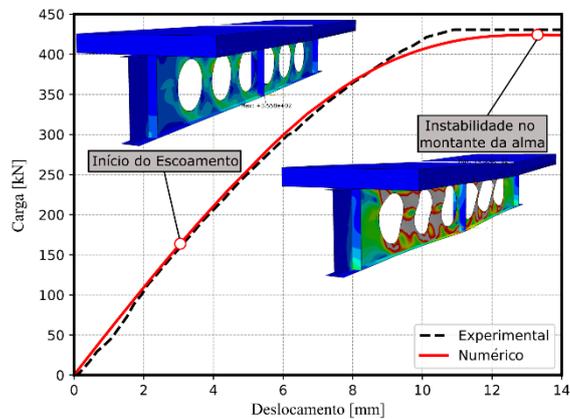
Fonte: Autor (2025)

O modelo numérico M2 apresentou um comportamento estrutural similar ao do modelo M1, evidenciando também a ocorrência do FMA. O escoamento do aço foi registrado em deslocamentos relativamente baixos, por volta de 2,7 mm, sob uma carga de 145,51 kN (Figura 5.14). Entretanto, a instabilidade se manifestou de forma mais acentuada com um deslocamento de 13,12 mm, sob uma carga de 420,24 kN.

O modelo M2 apresentou pequenas deformações na laje de concreto decorrentes do dano por compressão (Figura 5.15 A)). No entanto, a aplicação de carga no modelo, realizada por meio de uma chapa central na viga, resultou na formação de fissuras na região central, associadas ao dano por tração, conforme ilustrado na Figura 5.15 B). A

área mais afetada pelas fissuras foi a parte inferior central do steel deck; contudo, essas fissuras não foram responsáveis pela instabilidade da viga.

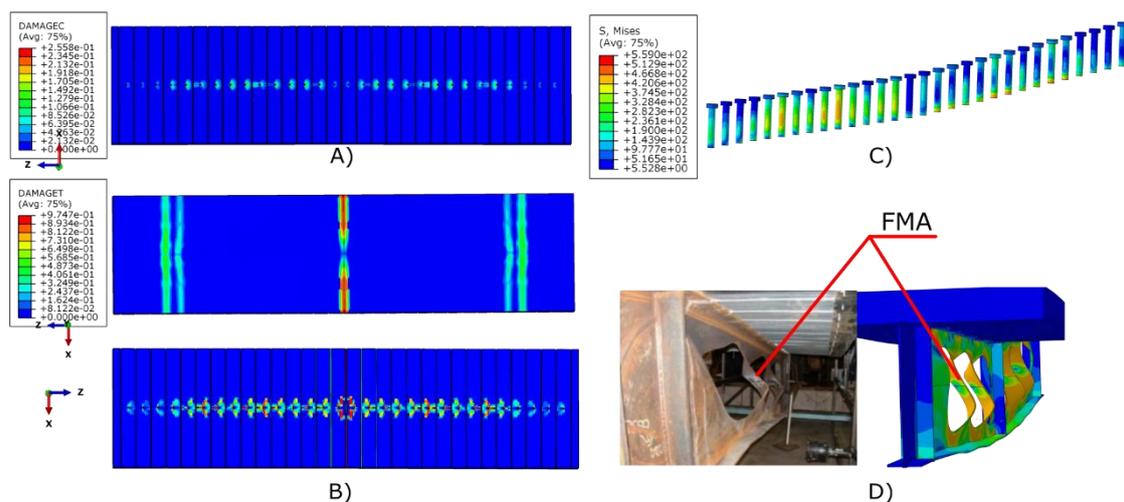
**Figura 5.14:** Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M2



Fonte: Autor (2025)

Em relação aos conectores, as tensões observadas permaneceram abaixo da resistência última do aço, garantindo a ausência de arrancamento e assegurando a integridade da conexão ao longo de todo o processo (Figura 5.15 C). Por fim, a falha no modelo numérico, evidenciada na Figura 5.15 D), foi idêntica à observada no modelo experimental, sendo caracterizada pela FMA.

**Figura 5.15:** Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M2

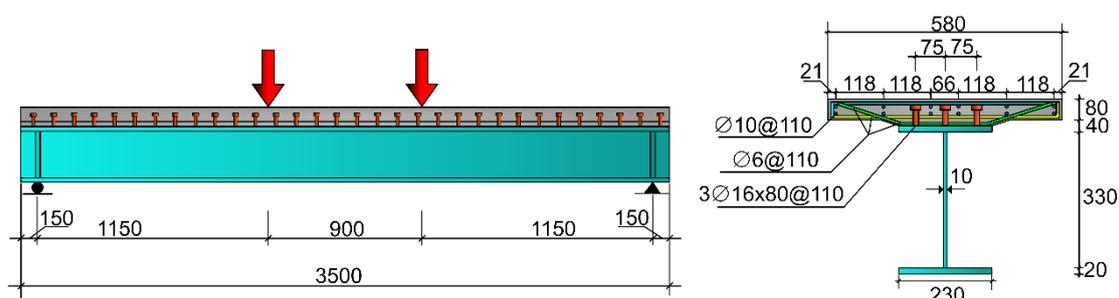


Fonte: Autor (2025)

### 5.3.2 Modelo M3 (Tong *et al.*, 2022)

O modelo M3, analisado por Tong *et al.* (2022), investigou o desempenho de uma viga mista composta por aço de alta resistência e UHPC. A seção estrutural inclui um perfil H350x230x10x20 mm, reforçado com barras transversais de 6 mm de diâmetro e barras longitudinais de 10 mm. A laje, com dimensões de 580 mm x 100 mm, foi modelada utilizando os modelos constitutivos de Carreira e Chu (1985) para o comportamento em compressão e de Li e Leung (1992) para tração, refletindo as propriedades do UHPC. Com um vão de 3200 mm, a viga foi submetida a uma carga concentrada aplicada no centro. Detalhes adicionais sobre as configurações estão ilustrados na Figura 5.16.

**Figura 5.16:** Geometria do modelo M3 (dimensões em mm)



Fonte: Autor (2025)

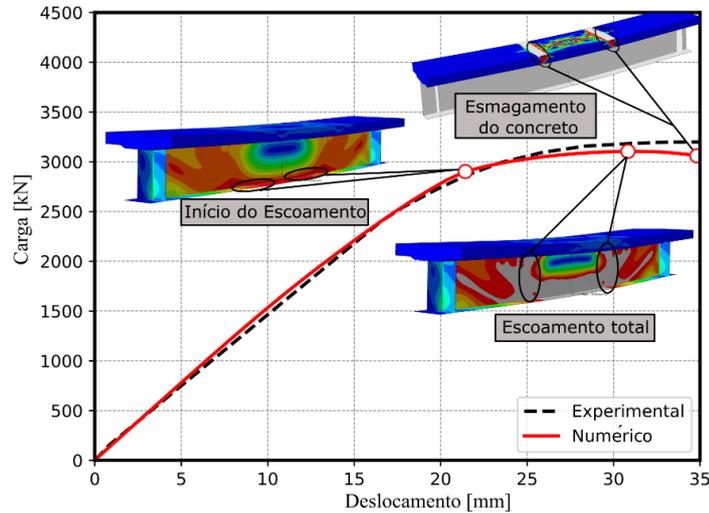
A Figura 5.17 revela que o modelo M3 teve um escoamento inicial com deslocamento de 20,0 mm sob uma carga de 2714,64 kN. À medida que o deslocamento aumentou para 31,0 mm, o perfil alcançou a plasticidade, suportando uma carga máxima de 3104,72 kN. Por fim, o esmagamento completo do concreto ocorreu a um deslocamento de 34,8 mm.

O modelo M3, ao contrário dos anteriores, apresentou um comportamento diferenciado, marcado por maiores deformações na laje de concreto. Essa característica pode ser atribuída ao perfil de alma cheia em aço de alta resistência, que preveniu a ocorrência de instabilidade no aço.

Nas Figura 5.18 A1) e A2), observa-se o esmagamento do concreto nas regiões de aplicação da carga, com propagação em direção ao centro da laje. A aplicação da carga induziu a flexão da viga, o que gerou compressão no concreto, resultando no esmagamento. Essa flexão também causou uma curvatura na laje, transmitindo tensões significativas aos conectores, como evidenciado na Figura 5.18 A3). Essas tensões

alcançaram valores próximos à resistência de ruptura em alguns conectores (Figura 5.18B)), mas sem comprometer a estabilidade geral do sistema.

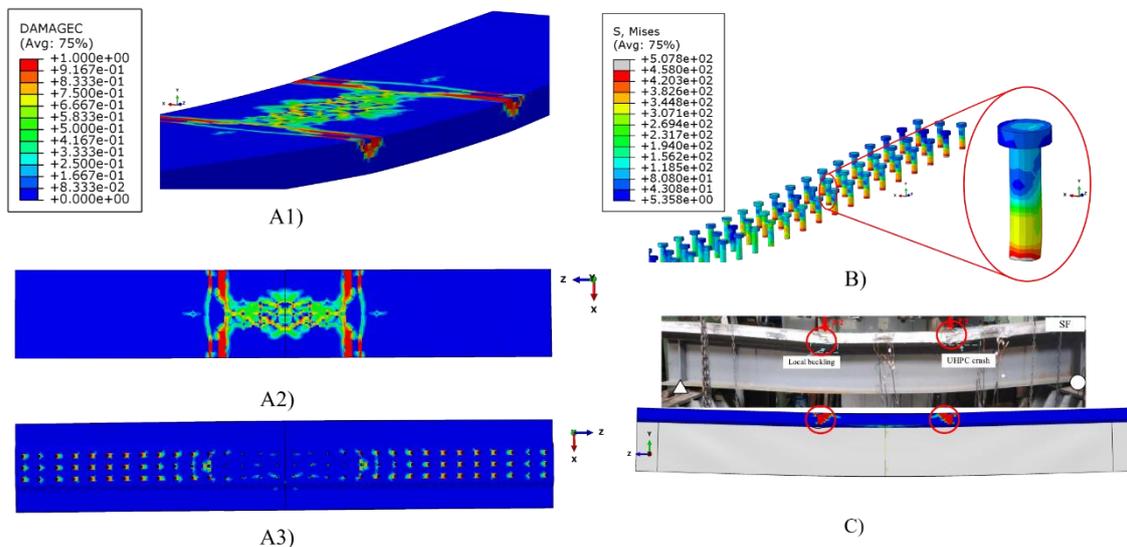
**Figura 5.17:** Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M3



Fonte: Autor (2025)

Em contraste, os danos relacionados à tração foram mínimos, sem a formação de fissuras relevantes na laje. Por fim, a Figura 5.18 C) apresenta a comparação entre os resultados experimentais e numéricos, demonstrando uma boa correspondência entre ambos, validando a precisão do modelo numérico.

**Figura 5.18:** Danos por compressão (A1, A2 e A3), tensões nos conectores (B) e comparação entre falhas experimental e numérica (C) do modelo M3



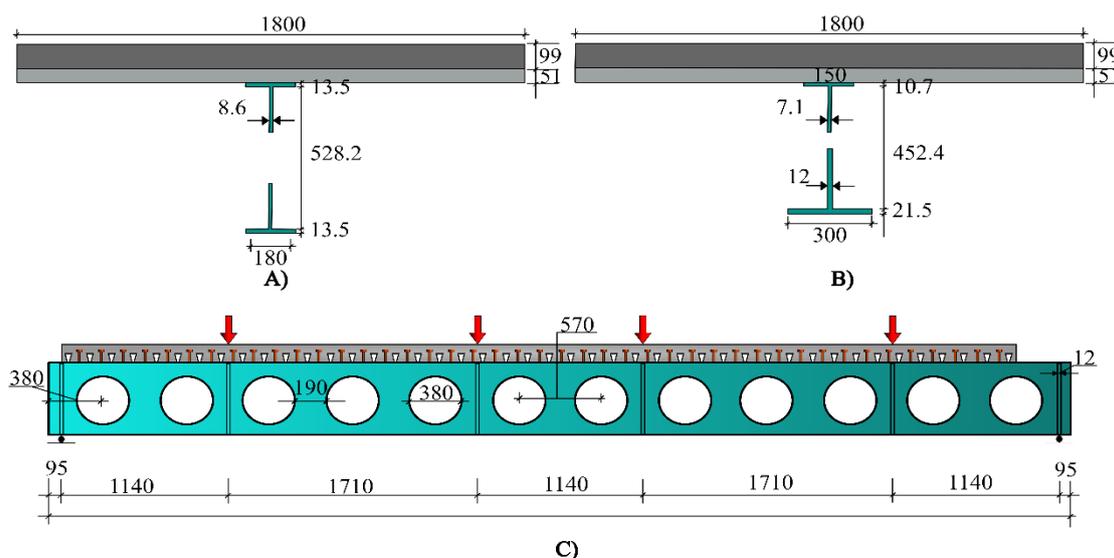
Fonte: Autor (2025)

### 5.3.3 Modelo M4 e M5 (MÜLLER *et al.*, 2006)

O modelo M4 ensaiado por Müller *et al.* (2006), consiste em uma viga celular mista com seção simétrica, formada por um perfil IPE400. Esse perfil apresenta aberturas de 380 mm de diâmetro e enrijecedores laterais com 12 mm de espessura. A laje de concreto possui uma espessura total de 130 mm, sendo 51 mm referentes às nervuras da forma de aço incorporada. Para garantir a interação entre os materiais, foram utilizados conectores de pino com cabeça de 100 mm de comprimento, dispostos com espaçamento de 150 mm.

Já o modelo M5 também investigado por Müller *et al.* (2006), caracteriza-se por uma seção assimétrica composta por dois perfis metálicos distintos. O perfil superior é uma seção IPE300, enquanto o perfil inferior corresponde a uma seção HEB34. Todas as demais propriedades do modelo M5 são similares às do modelo M4. Informações complementares sobre os modelos M4 e M5 estão apresentadas na Figura 5.19.

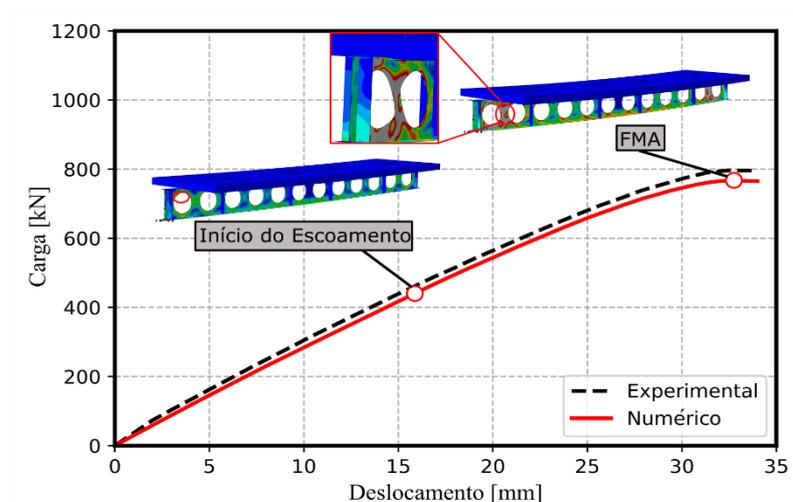
**Figura 5.19:** Geometria do modelo M4 e M5 (dimensões em mm)



Fonte: Autor (2025)

No modelo numérico M4, o escoamento do aço foi iniciado na região da abertura localizada abaixo do ponto onde não havia laje de concreto (Figura 5.20). Esse comportamento foi observado sob um deslocamento de 15,9 mm e uma carga de 440,16 kN. Com o aumento progressivo da carga, ocorreram deformações crescentes, evidenciadas por deslocamentos significativos na estrutura. A falha foi registrada quando o deslocamento atingiu 32,76 mm, sob uma carga máxima de 767,56 kN, sendo atribuída à FMA, o que resultou na perda de estabilidade do sistema (Figura 5.20).

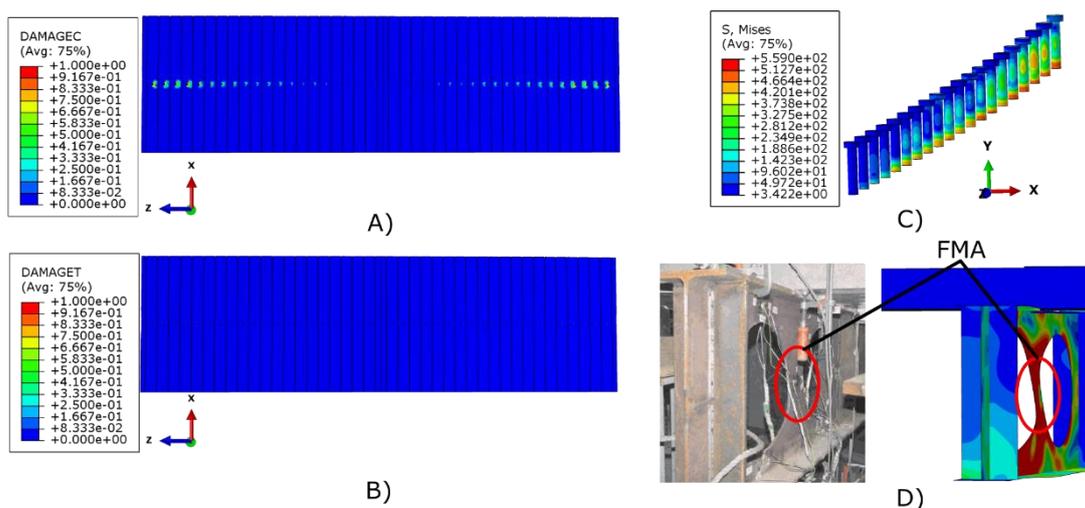
**Figura 5.20:** Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M4



Fonte: Autor (2025)

O dano no concreto foi identificado principalmente na parte inferior da laje, devido ao efeito de flexão da viga, conforme mostrado na Figura 5.21 A) e B). Contudo, como evidenciado na Figura 5.21 C), os conectores operaram com tensões significativamente inferiores à sua resistência última, o que assegurou a interação completa entre os elementos mistos. Tanto no modelo numérico quanto no experimental, a falha foi caracterizada pela instabilidade no montante da alma, ocorrendo na região onde a laje estava ausente no perfil celular, como ilustrado na Figura 5.21 D).

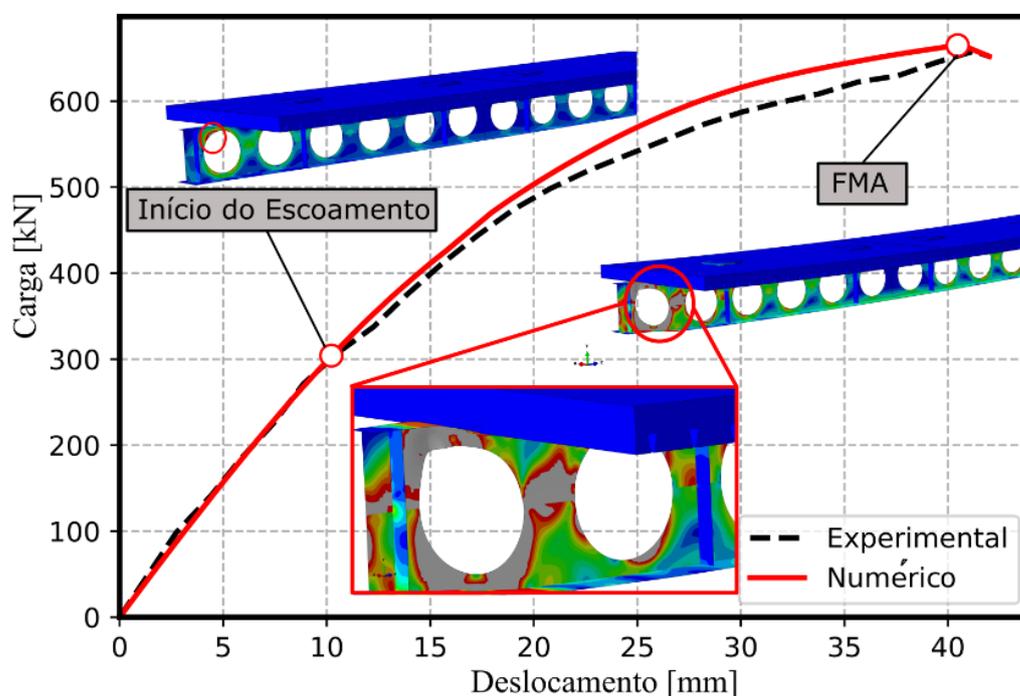
**Figura 5.21:** Danos por compressão (A) e tração (B), tensões nos conectores (C) e comparação entre falhas experimental e numérica (D) do modelo M4



Fonte: Autor (2025)

O modelo numérico M5, apresentou um comportamento estrutural semelhante ao do modelo M4. O início do escoamento foi identificado na abertura localizada na região sem laje de concreto (Figura 5.22), sob uma carga de 304,10 kN e um deslocamento de 10,22 mm. Com o aumento progressivo da carga, o modelo exibiu deformações crescentes até atingir um deslocamento de 40,47 mm e uma carga máxima de 664,91 kN. Nesse ponto, ocorreu a instabilidade no montante da alma, caracterizando a perda de estabilidade estrutural. Apesar de o modelo M5 ter demonstrado maior flexibilidade estrutural em comparação ao modelo M4, sua capacidade de resistência foi inferior.

**Figura 5.22:** Curvas Carga-Deslocamento: Avaliação do Comportamento e Pontos de Instabilidade do Modelo M5

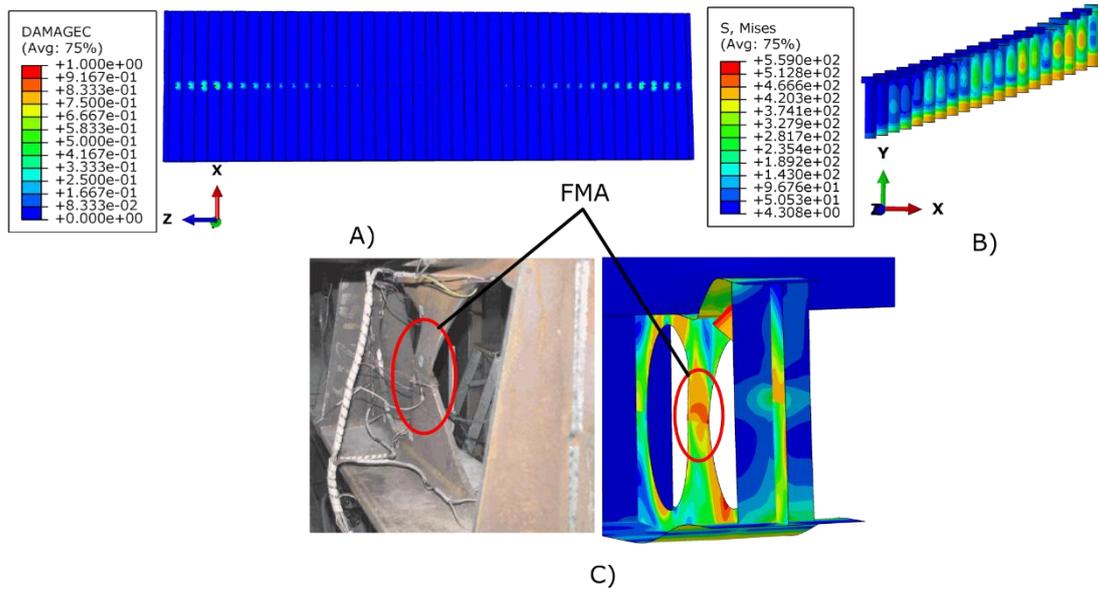


Fonte: Autor (2025)

No que diz respeito ao desenvolvimento de danos no concreto, o modelo M5 apresentou um comportamento menos severo em comparação ao modelo M4, não sendo observada nenhuma fissuração na laje (Figura 5.23 A)). Além disso, os conectores foram submetidos a menores solicitações, mantendo-se dentro de limites seguros (Figura 5.23 B)). A falha foi atribuída à instabilidade no montante da alma (Figura 5.23 C)), sendo identificada uma certa descontinuidade, decorrente das diferenças nos tipos de aço e nas variações geométricas empregadas na composição do perfil celular.

A Tabela 5.3 representa a comparação entre os modelos experimentais e numéricos. As pequenas diferenças observadas são mínimas, destacando a eficiência da modelagem para representar o comportamento estrutural

**Figura 5.23:** Danos por compressão (A), tensões nos conectores (B) e comparação entre falhas experimental e numérica (C) do modelo M5



Fonte: Autor (2025)

**Tabela 5.3:** Comparação das carga últimas

Modelo	Experimental [kN]	Numérico [kN]	$P_{Exp}/P_{Num}$
M1	369.83	369.42	1.001
M2	430.72	424.20	1.015
M3	3256.40	3104.72	1.049
M4	805,60	765,56	1,052
M5	658,00	664,91	0,990

Fonte: Autor (2025)

# **6 ESTUDO PARAMÉTRICO**

Os estudos paramétricos foram divididos em dois grupos. O primeiro analisou a influência da geometria do perfil, considerando 360 modelos numéricos. O segundo investigou a variação da resistência do aço e do concreto, a espessura da alma e a presença de enrijecedores, abrangendo 120 modelos numéricos. Para todos os casos, o comportamento do concreto à compressão e à tração foi representado pelos modelos constitutivos de Carreira e Chu (1985) e Hordijk (1992) respectivamente.

O modelo constitutivo adotado para representar a viga metálica foi o modelo quadrilinear de Yun e Gardner (2017), enquanto que para as armaduras transversais e longitudinais, o modelo elastoplástico com encruamento linear positivo. Por fim para os conectores de cisalhamento optou-se pelo modelo elastoplástico perfeito.

### 6.1 INFLUÊNCIA GEOMÉTRICA

A primeira investigação paramétrica teve como objetivo principal avaliar a influência da geometria no desempenho de vigas mistas celulares, compostas por aço e concreto de alta resistência, com foco nas instabilidades estruturais sofridas pela peça. Para isso, foram selecionados 6 perfis I (Tabela 6.1) e realizadas variações nos seguintes parâmetros: a relação entre a abertura do alvéolo ( $D_o$ ) e a altura do perfil original ( $d$ ) em 5 proporções (0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2); a relação entre o espaçamento dos centros dos alvéolos ( $P$ ) e  $D_o$  em 4 proporções (1,2; 1,3; 1,4; 1,5) e os comprimentos da peça, que foram testados em 4,0 , 5,0 e 6,0 metros (Figura 6.1).

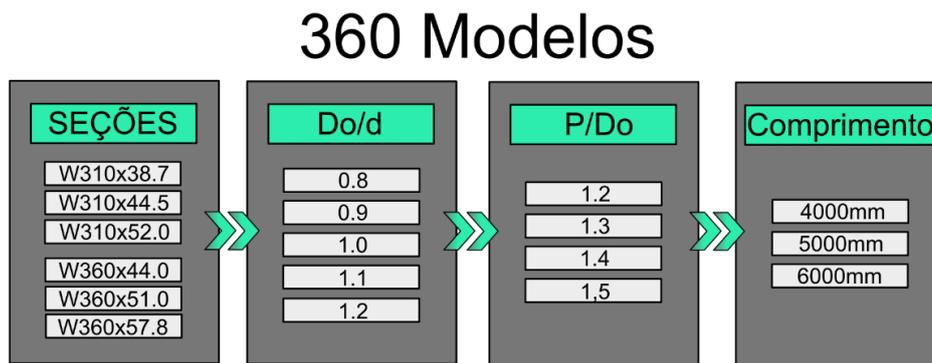
Em relação à altura da laje, nesse caso, foi definida como sendo de 100mm. O aço utilizado para o perfil é o S460, classificado como aço de alta resistência, conforme a literatura (FANG; CHAN, 2018b, 2019b; HASSANEIN *et al.*, 2021). Os conectores de cisalhamento adotados foram pinos com cabeça, com 80 mm de comprimento e 32 mm de diâmetro, dispostos em duas fileiras. Além disso, foi utilizada a malha A142 de reforço na parte superior da laje, seguindo a configuração adotada no modelo M1.

**Tabela 6.1:** Geometria das seções

Seções	$d$ [mm]	$b_f$ [mm]	$t_w$ [mm]	$t_f$ [mm]
W310x38,7	310,0	165,0	5,8	9,7
W310x44,5	313,0	166,0	6,6	11,2
W310x52,0	317,0	167,0	7,6	13,2
W360x44,0	352,0	171,0	6,9	9,8
W360x51,0	355,0	171,0	7,2	11,6
W360x57,8	358,0	172,0	7,9	13,1

Fonte: Autor (2025)

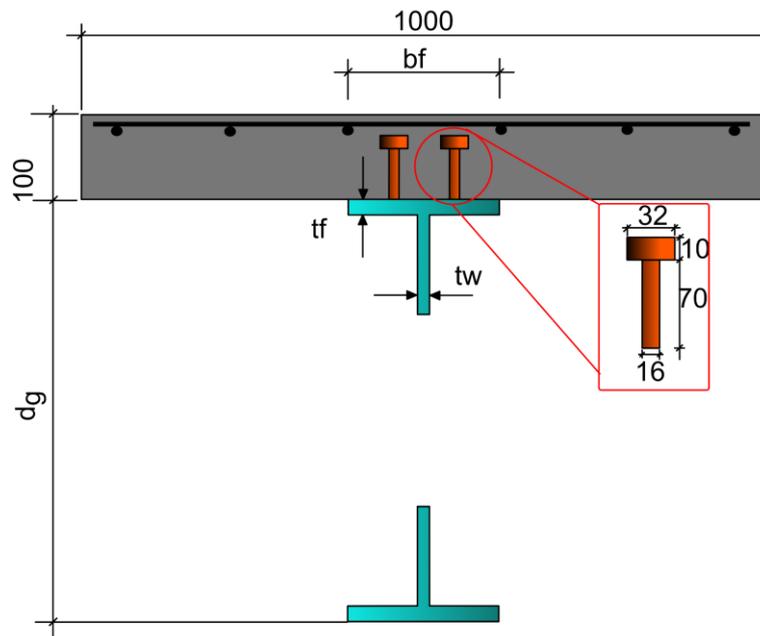
**Figura 6.1:** Parâmetros analisados



Fonte: Autor (2025)

A Figura 6.2 apresenta a forma generalizada da viga mista, enquanto as propriedades mecânicas dos materiais empregados na análise paramétrica estão detalhadas na Tabela 6.2.

**Figura 6.2:** Configuração da seção geométrica



Fonte: Autor (2025)

**Tabela 6.2:** Propriedades dos materiais utilizados

Elemento	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$f_y$ [Mpa]	$f_u$ [Mpa]	$f_i$ [Mpa]	$f_{ck-cubic}$ [Mpa]
Laje de Concreto	34600,0	0,2	-	-	6,68	72,80
Perfil Metálico	210000,0	0,3	460,0	540,0	-	-
Armaduras	200000,0	0,3	460,0	559,0	-	-
Pino com cabeça	200000,0	0,3	375,0	458,0	-	-

Fonte: Autor (2025)

## 6.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS

A segunda parametrização foi definida para obter a resposta das vigas mistas celulares mediante a variação da resistência dos materiais, a espessura da alma do perfil celular e a quantidade de enrijecedores aplicados na peça (Figura 6.3).

Baseado no modelo M1, a configuração geométrica da seção são as mesmas apresentadas na Figura 5.10. As únicas alterações do modelo foram a espessura e o posicionamento do enrijecedor em alguns casos para investigar a influência.

**Figura 6.3:** Parâmetros analisados



Fonte: Autor (2025)

As propriedades dos aços foram determinadas de acordo com os modelos encontrados na literatura que estão apresentados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3:** Referências para os parâmetros utilizados nos aços

Referência	Classe	E [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [Mpa]	$\epsilon_u$ (%)	$\epsilon_f$ (%)
Cao <i>et al.</i> (2023)	S550	205000,00	1073,00	1356,00	2,00	-
Ferreira <i>et al.</i> (2024)	S690	204393,00	969,00	1024,00	5,80	16,00
Zhang, Su e Jiang (2024)	S890	202144,00	893,40	931,96	4,67	13,01
Su <i>et al.</i> (2021)	S960	200000,00	759,00	940,50	-	-
Kumar, Anbarasu e Sonkar (2024)	S1100	197000,00	559,00	624,00	-	-

Fonte: Autor (2025)

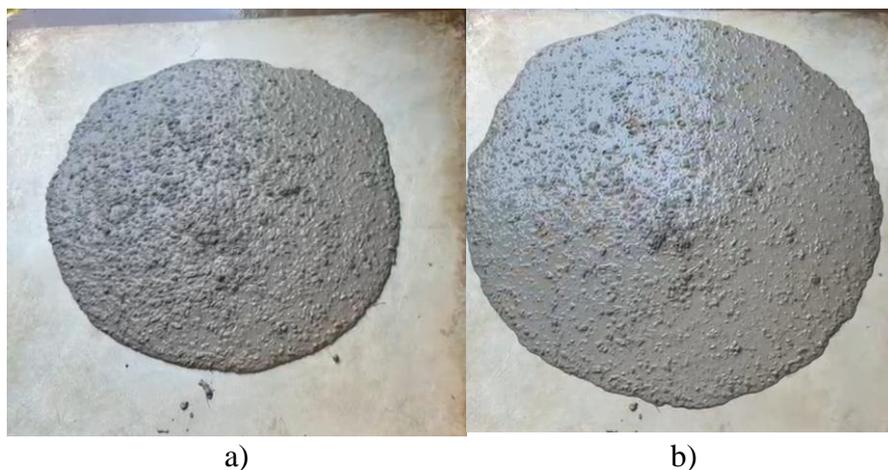
## **7 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

## 7.1 CONCRETO

### 7.1.1 Estado Fresco

Na Figura 7.1 é possível observar que o concreto está em um estado IEV 0, um SF2 (725 mm) e por meio da gravação do experimento o  $t_{500} > 2$ , e, portanto, VS2.

**Figura 7.1:** Concreto no ensaio Slump Flow; a)  $t_{500}$  do concreto; b) Diâmetro do concreto final SF

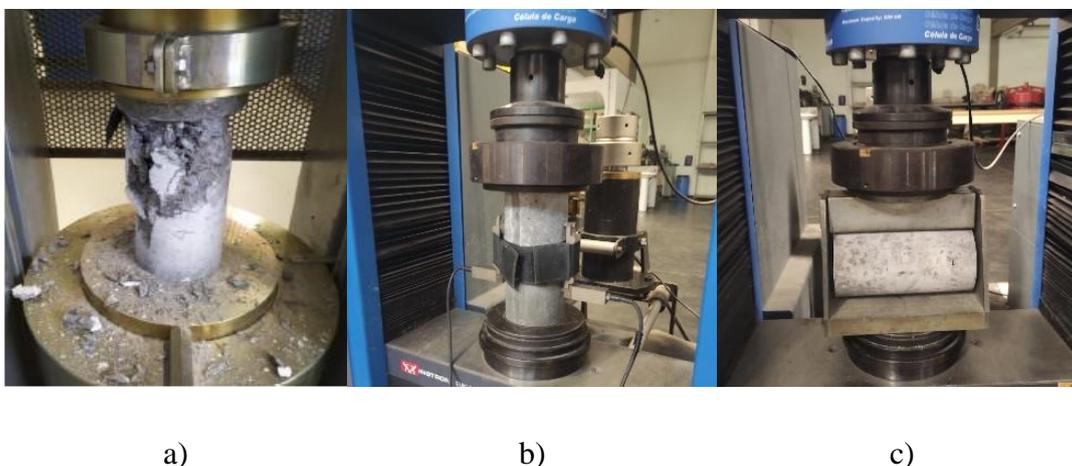


Fonte: Autor (2025)

### 7.1.2 Estado Endurecido

Os resultados vieram de uma média dos seis corpos de prova. Para o ensaio de compressão apresentou média de tensão de rompimento de  $f_{cm} = 72,80$  MPa, com desvio de 3,60 MPa. Para o módulo de elasticidade a média gerou  $E_{cm} = 34,60$  GPa e um desvio de 1,90 GPa. Por fim, o teste de compressão radial teve uma resistência a tração média  $f_{tm} = 6,68$  MPa ( $f_{tm,sp} = 7,42$  MPa) com um desvio de 1,40 MPa.

**Figura 7.2:** a) Compressão axial; b) Módulo de elasticidade; c) Compressão diametral

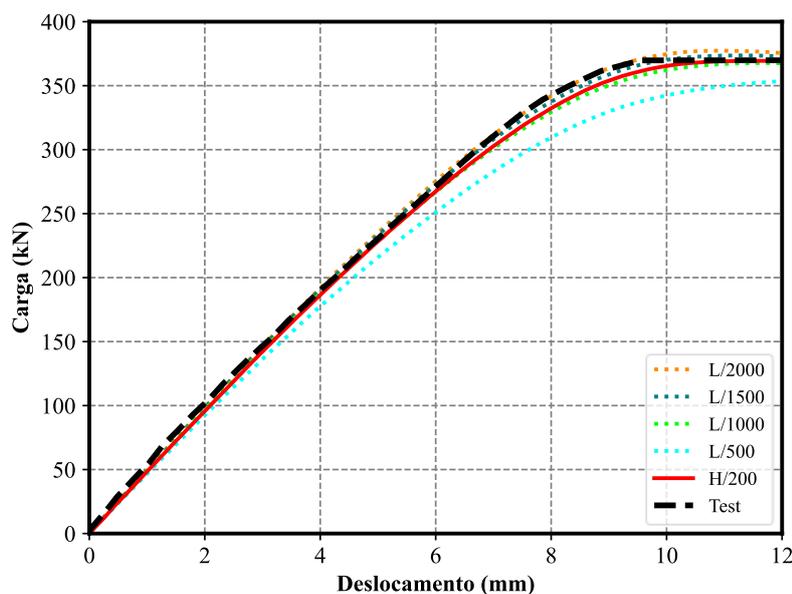


Fonte: Autor (2024)

## 7.2 ESTUDO DE SENSIBILIDADE

Foi realizado um estudo de sensibilidade na aplicação da imperfeição geométrica inicial, a fim de encontrar o fator que melhor representasse os modelos numéricos utilizados. Por recomendações da ABNT NBR 8800:2024 considera-se aplicar L/1000, enquanto a EN 1993-1-5, orienta o uso de H/200 para flambagem local. Através do modelo M1 de Nadjai *et al.* (2007) e Vassart (2009), foram testados valores de L/2000, L/1500, L/1000, L/500 e H/200 (**Figura 7.3**).

**Figura 7.3:** Teste de Sensibilidade da imperfeição geométrica inicial



Fonte: Autor (2025)

Ao analisar a **Figura 7.3** nota-se que à medida que se diminui o denominador na relação, a curva tende a cair, pois o grau de imperfeição se torna maior. A aproximação do modelo experimental está melhor representada pelas curvas L/1000 e H/200. No entanto, a imperfeição de H/200 foi escolhida, pois sua carga última apresentou um erro de 0,11%, enquanto a curva de L/1000 apresentou uma diferença de 0,56% (Tabela 7.1).

**Tabela 7.1:** Comparação entre as cargas últimas

Modelo	Carga última [kN]	Erro [%]
Experimental	369,83	-
L/2000	377,36	2,03
L/1500	373,64	1,03
L/1000	367,74	0,56
L/500	354,62	4,11
H/200	369,42	0,11

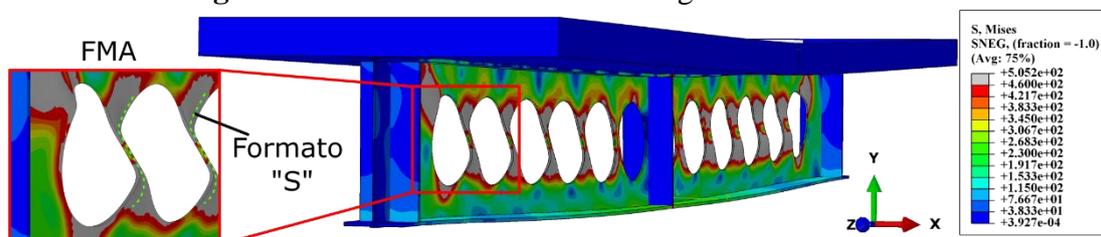
Fonte: Autor (2025)

### 7.3 ANÁLISE PARAMÉTRICA I

As vigas mistas analisadas apresentaram três principais mecanismos de falha estrutural: FMA, MV e uma combinação desses dois modos. A FMA foi o modo de falha predominante, ocorrendo em 82,8% dos casos (298 modelos). O MV foi identificado em 8,6% dos casos, enquanto os 8,6% restantes apresentaram uma interação entre ambos os modos de falha.

A FMA, ilustrada na Figura 7.4, é caracterizada pelo deslocamento do trecho da alma situado entre as aberturas, resultando em uma deformação em formato de “S”. Esse comportamento é consequência da combinação de esforços de compressão e flexão, que se concentraram nas regiões mais vulneráveis da alma devido às características geométricas do modelo.

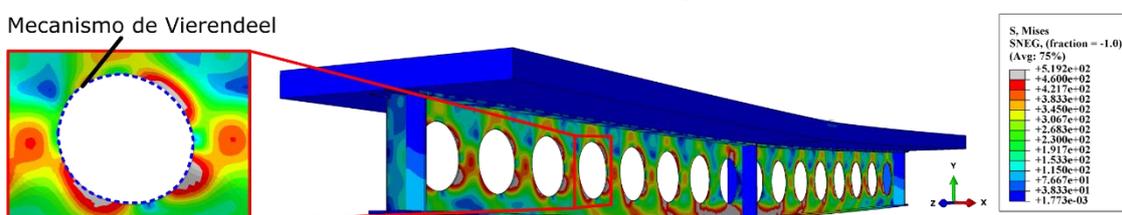
**Figura 7.4:** FMA desenvolvido nas vigas mistas celulares



Fonte: Autor (2025)

A instabilidade pelo MV, ilustrada na Figura 7.5, foi caracterizada pelo achatamento das aberturas e pela concentração de tensões nas bordas dessas regiões. Esse comportamento resulta da redistribuição das forças de cisalhamento, que induz deformações nas extremidades das aberturas. Esse tipo de instabilidade predominou nos casos em que o espaçamento entre as aberturas (P) era maior, dificultando a formação da FMA.

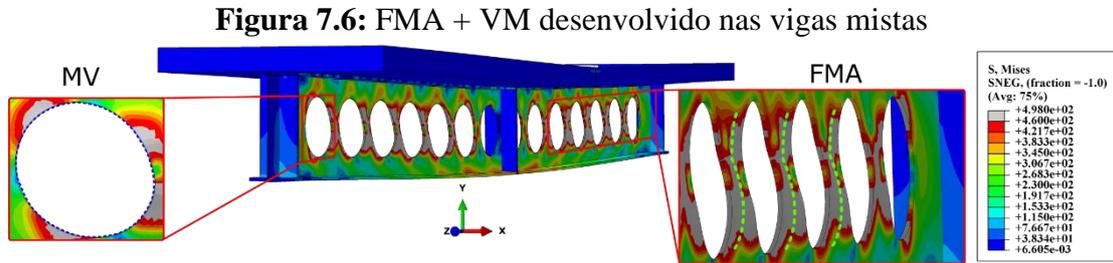
**Figura 7.5:** VM desenvolvido nas vigas mistas celulares



Fonte: Autor (2025)

Nos modelos em que ocorreu a interação entre os dois mecanismos de falha, a combinação das instabilidades resultou em efeitos ainda mais críticos, conforme ilustrado na Figura 7.6. Nesse contexto, a viga apresentou, em determinadas regiões, a deformação

em “S” característica da FMA, enquanto em outras, as aberturas exibiram o achatamento típico do MV. Essa interação intensificou os danos estruturais, ocasionando uma perda significativa da capacidade resistente e um maior comprometimento da estabilidade global.



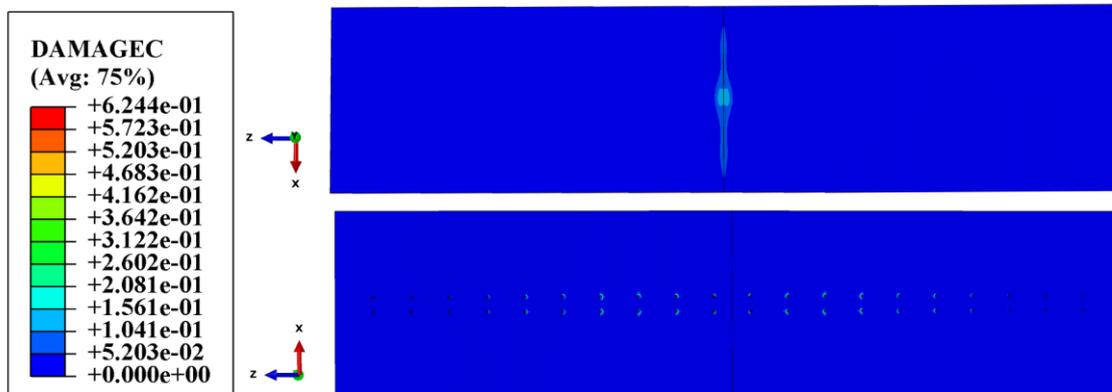
Fonte: Autor (2025)

No Apêndice A está listado a classificação detalhada dos tipos de instabilidade observados em todos os modelos simulados. A laje de concreto dos modelos analisados não foi responsável pela falha estrutural dos elementos, pois os danos causados pela compressão tiveram pouca influência tanto na parte superior quanto na inferior da laje. Há também a formação de fissuras na parte superior, originadas por tensões secundárias que tracionaram a superfície da zona previamente comprimida (Figura 7.7).

Por outro lado, os danos por tração, formados pela flexão do momento positivo, criaram as fissuras na parte inferior da laje (Figura 7.8). Observa-se que também há formação de fissuras na parte superior, originadas por tensões secundárias que tracionaram a superfície da zona previamente comprimida.

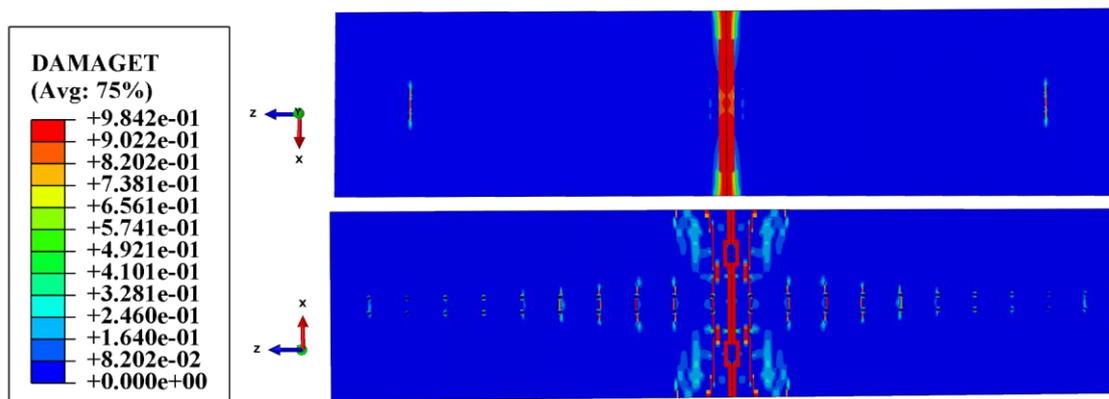
É importante destacar que, embora o concreto de alta resistência contribua significativamente para o desempenho à compressão, esse aprimoramento não ocorre de forma proporcional em relação à resistência à tração (NEVILLE, 1995).

**Figura 7.7:** Compressão nas lajes de concreto dos modelos paramétricos



Fonte: Autor (2025)

**Figura 7.8:** Tração nas lajes de concreto dos modelos paramétricos



Fonte: Autor (2025)

### 7.3.1 Influência dos parâmetros na resistência das vigas mistas celulares

As variáveis geométricas avaliadas, como a seção transversal, a relação de abertura ( $D_o/d$ ), o espaçamento entre aberturas ( $P/D_o$ ) e o comprimento da viga ( $L$ ), impactaram diretamente o desempenho estrutural das vigas mistas celulares. A interação entre esses parâmetros afetou significativamente a redistribuição de esforços e a manifestação dos modos de instabilidade, destacando a sensibilidade do sistema às modificações geométricas.

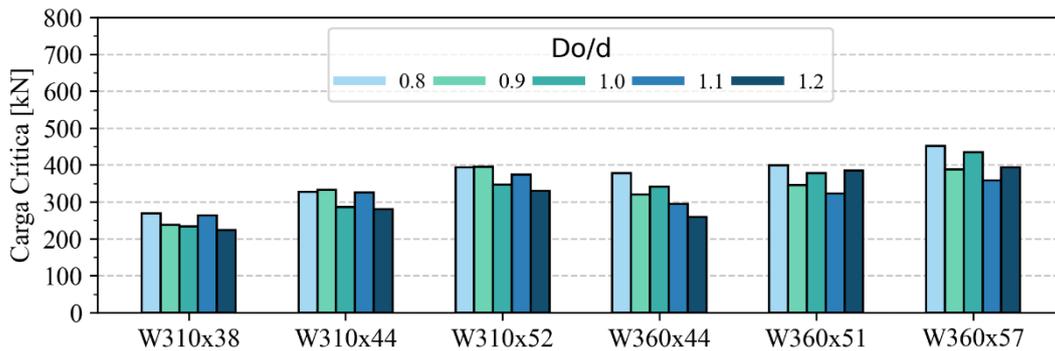
#### 7.3.1.1 Influência do tamanho da abertura ( $D_o/d$ )

Ferreira, Martins e Nardin (2021a) estudaram vigas mistas celulares de aço e concreto convencional e observaram que o aumento das aberturas reduz a resistência do elemento. No presente estudo paramétrico, que considera materiais de alta resistência, esse mesmo comportamento foi identificado (Figura 7.9). No entanto, assim como na pesquisa mencionada, houve uma inversão nessa tendência em determinado ponto, resultando em um aumento da resistência conforme a abertura foi ampliada.

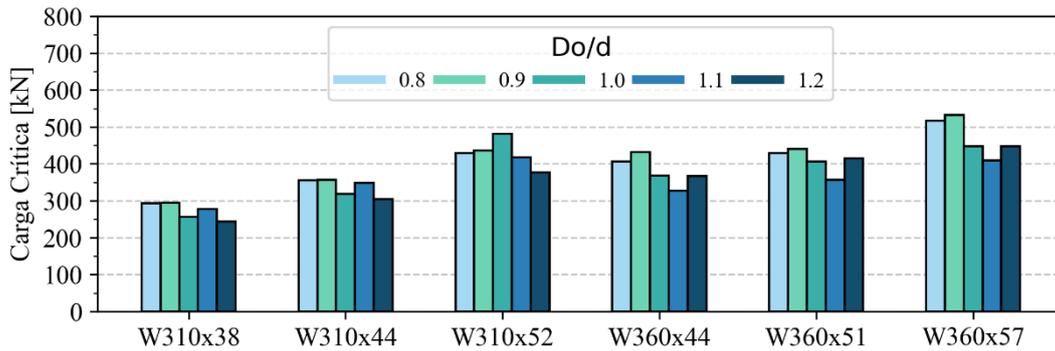
Na Figura 7.9 b), para o perfil W310x52, verificou-se que a relação  $D_o/d = 1,0$  apresentou uma capacidade de carga superior (481,02 kN) em comparação às relações  $D_o/d = 0,8$  (428,77 kN; -12,19%) e  $0,9$  (435,99 kN; -10,32%). A explicação para esse comportamento, como observado na Figura 7.10, está na disposição das aberturas ao longo da alma. Perfis com aberturas menores apresentaram um maior número de cortes ao longo de toda a seção da alma: 12 aberturas para  $D_o/d = 0,8$  e 10 para  $D_o/d = 0,9$ . Já o perfil com  $D_o/d = 1,0$ , devido ao maior tamanho das aberturas, passou a ter apenas 8 aberturas. Como não foi possível manter a mesma área vazada em todas as configurações, essa redistribuição resultou em uma maior resistência estrutural, contrariando a expectativa inicial de redução contínua da resistência com o aumento das aberturas.

No entanto, isso não significa que aumentar a abertura necessariamente leva ao aumento da resistência. Ao analisar a relação  $D_o/d = 1,2$  (Figura 7.10), que possui o mesmo número de aberturas do  $D_o/d = 1,0$ , observa-se que sua resistência é inferior à da relação  $D_o/d = 0,8$ , que possui 12 aberturas. Isso confirma que a principal influência não está apenas na quantidade de aberturas, mas na proporção de área vazada do elemento estrutural.

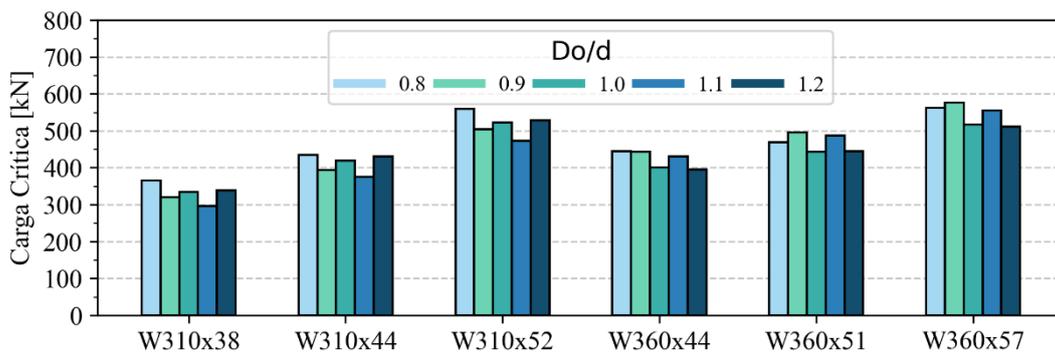
**Figura 7.9:** Influência das aberturas na resistência do elemento



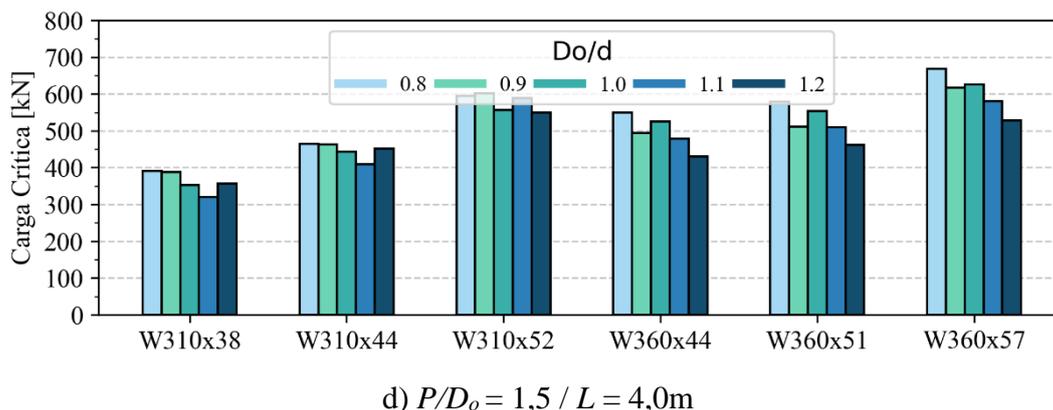
a)  $P/D_o = 1,2 / L = 4,0$  m



b)  $P/D_o = 1,3 / L = 4,0$  m

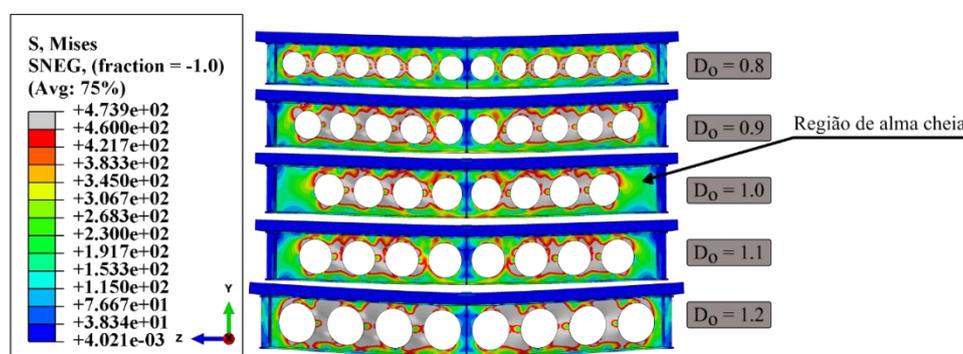


c)  $P/D_o = 1,4 / L = 4,0$  m



Fonte: Autor (2025)

Figura 7.10: Perfis W310x52 com diferentes relações  $D_o/d$ ,  $P/D_o = 1.3$  e  $L = 4.0m$



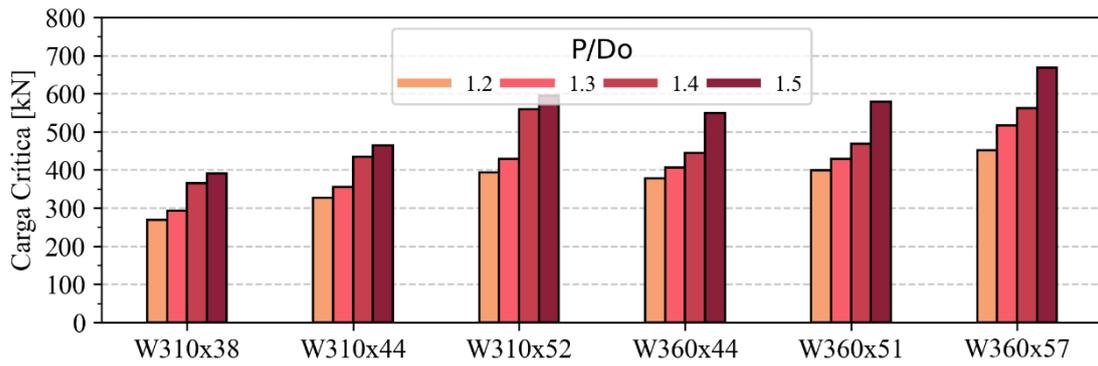
Fonte: Autor (2025)

### 7.3.1.2 Influência do espaçamento entre aberturas ( $P/D_o$ )

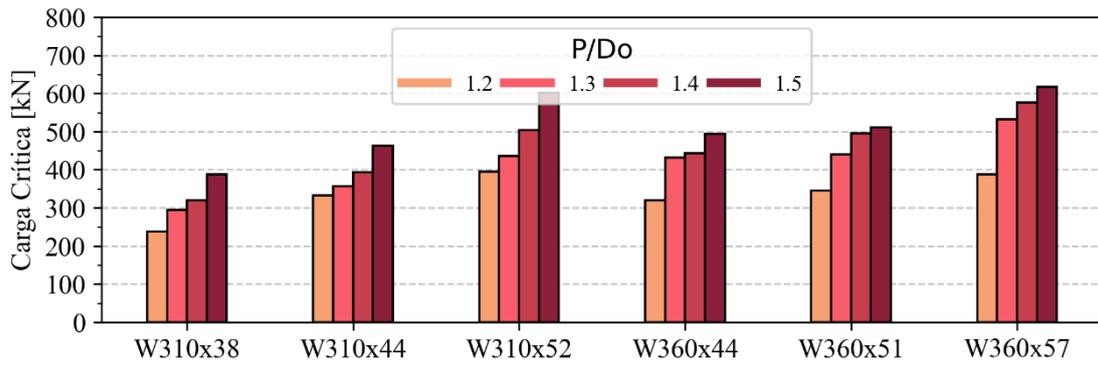
Uma investigação conduzida por Panedpojaman, Thepchatri, Limkatanyu (2014) demonstrou que, em perfis celulares de aço convencional, o aumento do espaçamento entre as aberturas resulta em uma maior resistência estrutural. No estudo desses autores, os modelos analisados com perfis IPE 400 apresentaram um acréscimo superior a 20% na resistência ao comparar as relações  $P/D_o$  de 1,1 e 1,2. Resultados similares foram observados no estudo paramétrico desta pesquisa, onde o aumento da relação  $P/D_o$  também contribuiu para ganhos na capacidade de resistência (Figura 7.11).

No que diz respeito à influência do espaçamento entre as aberturas na instabilidade do perfil, verificou-se que o aumento dessa distância ampliou a região de distribuição das cargas, resultando em um incremento na resistência do perfil. Conseqüentemente, o comportamento estrutural passou a apresentar uma maior propensão à instabilidade associada ao MV. Como ilustrado na Figura 7.12, ao atingir um espaçamento de 1,5, a instabilidade da viga deixou de ser predominantemente governada pela FMA e passou a ocorrer o MV.

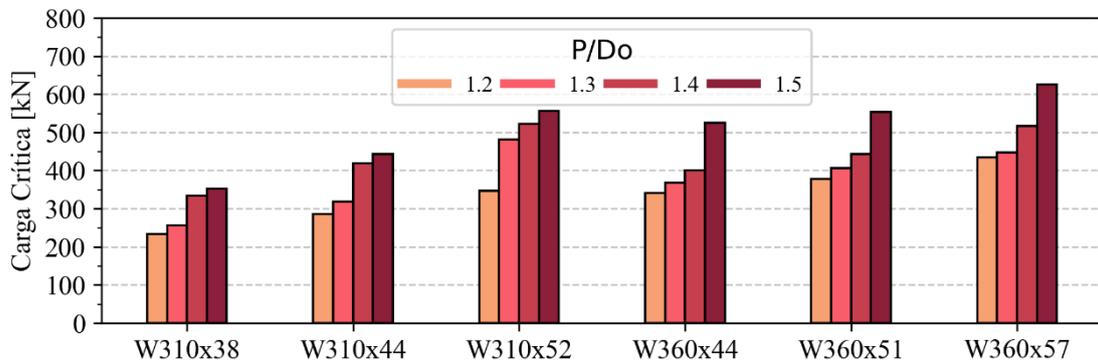
**Figura 7.11:** Influência do espaçamento das aberturas na resistência do elemento



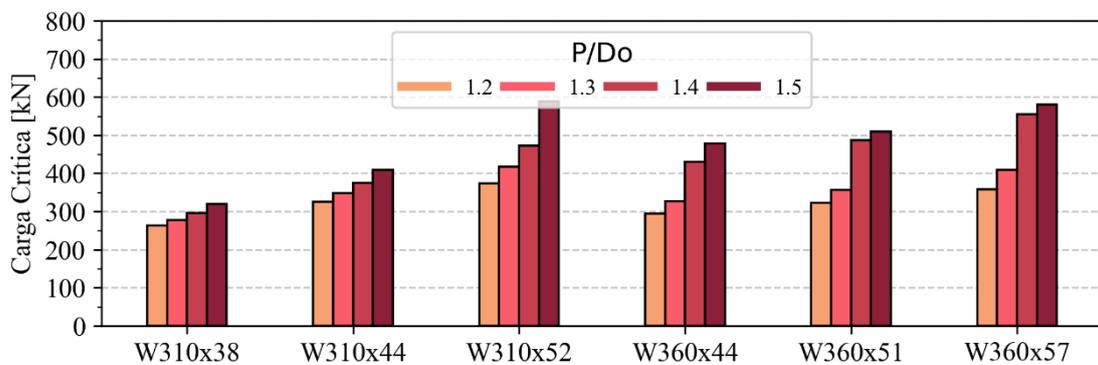
a)  $D_0/d = 0,8 / 4,0m$



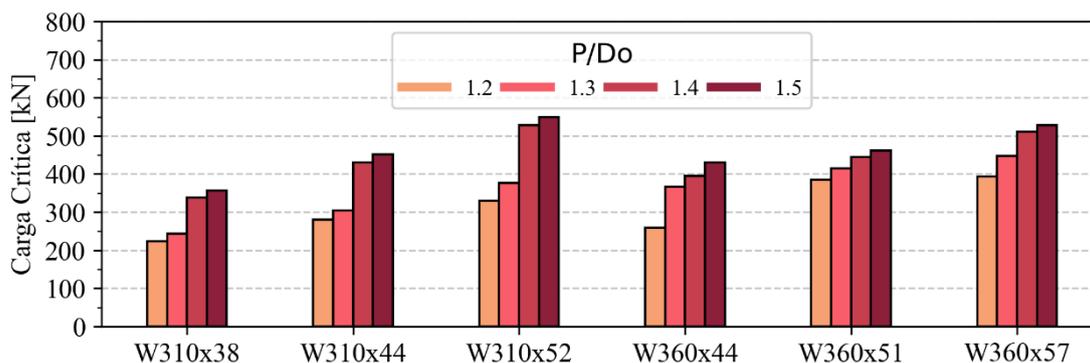
b)  $D_0/d = 0,9 / 4,0m$



c)  $D_0/d = 1,0 / 4,0m$



d)  $D_0/d = 1,1 / 4,0m$

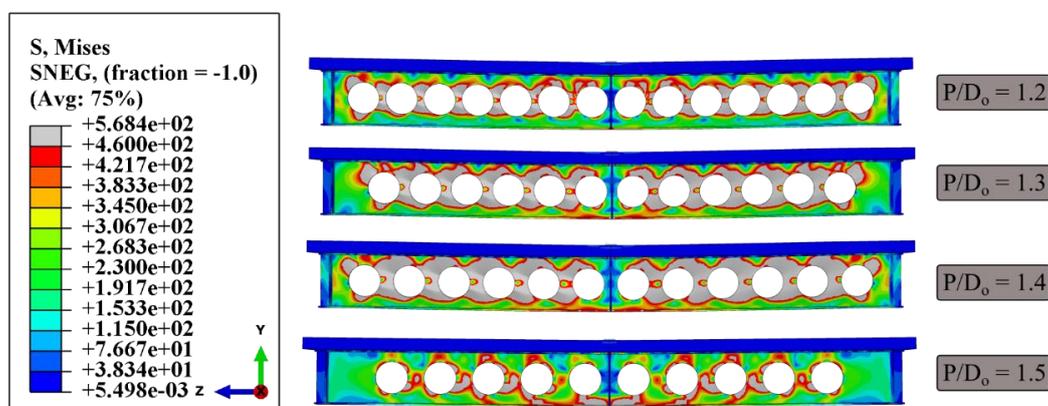


e)  $D_o/d = 1,2 / 4,0m$

Fonte: Autor (2025)

Além disso, na Figura 7.12 a diferença entre as vigas com relações  $P/D_o = 1,3$  e  $P/D_o = 1,4$  são os posicionamentos das aberturas, uma vez que a quantidade de alvéolos permaneceu inalterada. Embora, a viga com  $P/D_o = 1,3$  apresente uma zona inicial de alma cheia, sua resistência foi de 509,93 kN, enquanto a viga com  $P/D_o = 1,4$  atingiu 563,30 kN, representando um aumento de 10,47%. Esses resultados reforçam a influência da disposição das aberturas na resistência estrutural dessas vigas.

**Figura 7.12:** Perfis W360x57,8 com diferentes relações  $P/D_o$  e  $D_o/d = 0,8$   $L = 5,0m$



Fonte: Autor (2025)

### 7.3.1.3 Influência do comprimento (L)

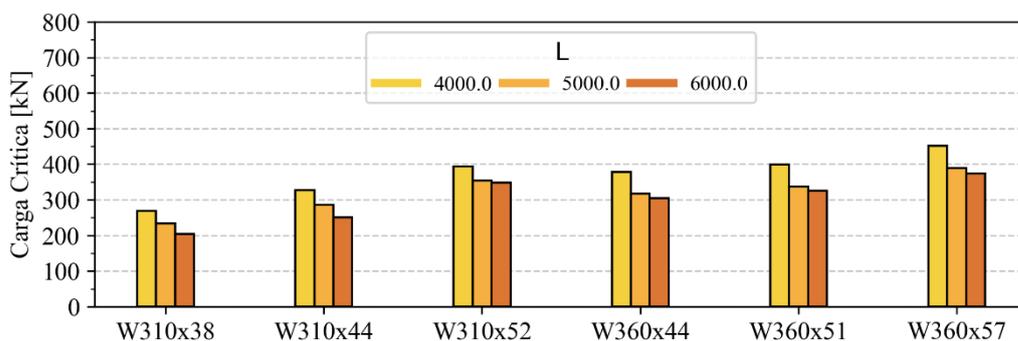
Redwood, Demirdjian (1998) investigaram a influência da variação do comprimento em perfis com aberturas, utilizando aço convencional ( $f_y = 345$  MPa). Mantendo a mesma seção e espessuras, os autores analisaram modelos com comprimentos de 1220 mm, 1828 mm e 2438 mm. Os resultados indicaram que todos os modelos falharam por FMA, com cargas críticas de 50,45 kN, 47,40 kN (-6,05%) e 42,20

kN (-16,35%), respectivamente. Esses dados evidenciam que, à medida que o comprimento do perfil aumenta, sua resistência estrutural diminui.

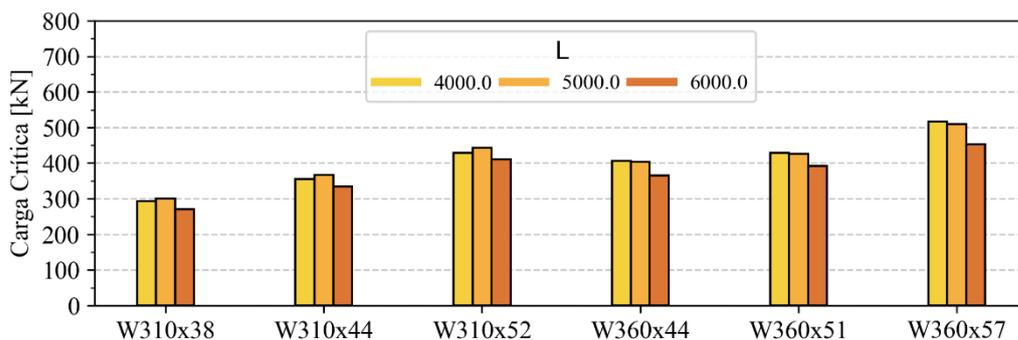
No presente estudo, a análise paramétrica com aço de alta resistência teve uma redução progressiva da resistência em perfis com comprimentos de 4000 mm, 5000 mm e 6000 mm. Na Figura 7.13 a), para o perfil W310x44,5, as cargas críticas observadas foram de 326,67 kN, 285,56 kN (-12,58%) e 250,37 kN (-23,36%) para os comprimentos de 4000 mm, 5000 mm e 6000 mm, respectivamente.

Entretanto, ao analisar o perfil W310x44,5 com  $P/D_o = 1,3$  (Figura 7.13 b)), verificou-se um comportamento atípico, em que a resistência do perfil com comprimento de 5000 mm foi superior à do modelo com 4000 mm. Esse fenômeno está diretamente relacionado à disposição das aberturas ao longo do perfil. Na Figura 7.14, observa-se que, para a viga de 5000 mm, quase toda a extensão do perfil foi preenchida com aberturas. Por outro lado, no perfil de 5000 mm com  $P/D_o = 1,3$  (Figura 7.15), a redução no número de aberturas resultou em uma maior proporção de área sólida, contribuindo para o aumento da resistência estrutural observado.

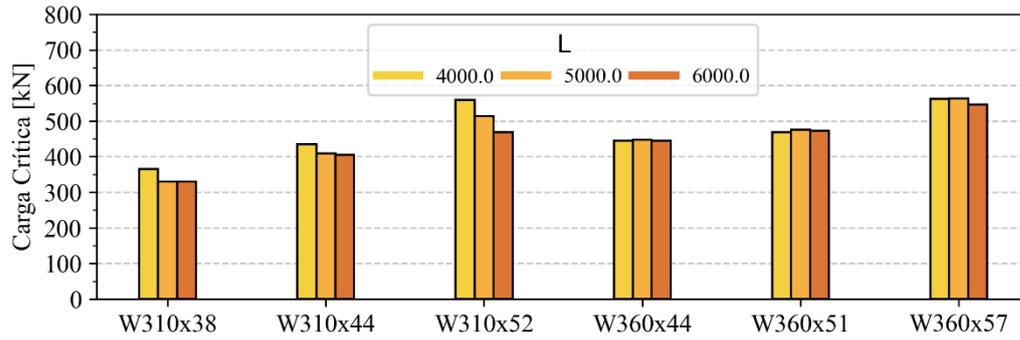
**Figura 7.13:** Influência do comprimento das vigas mistas na resistência do elemento



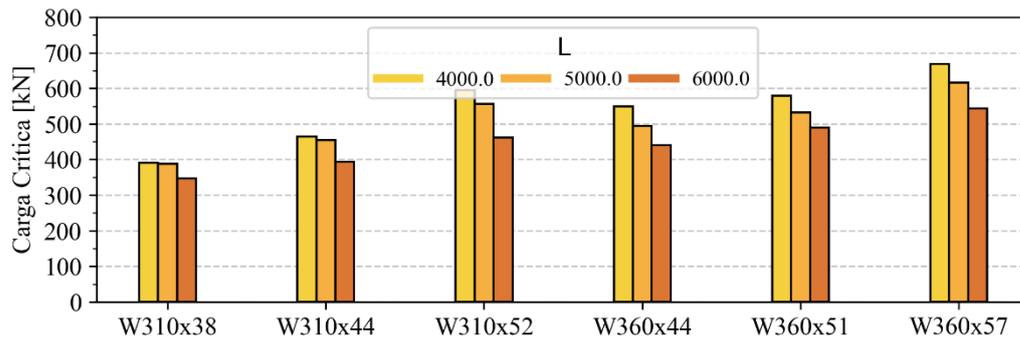
a)  $D_o/d = 0,8 / P/D_o = 1,2$



b)  $D_o/d = 0,8 / P/D_o = 1,3$



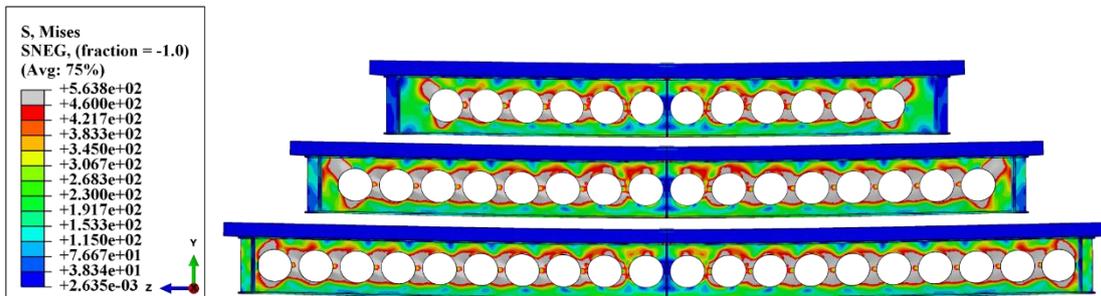
c)  $D_o/d = 0,8 / P/D_o = 1,4$



d)  $D_o/d = 0,8 / P/D_o = 1,4$

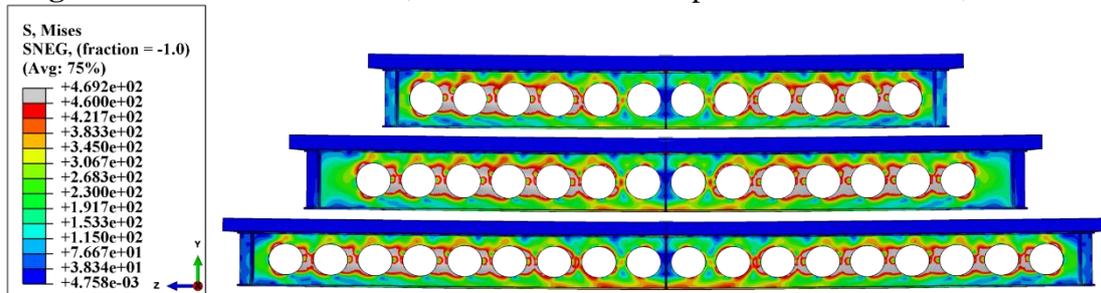
Fonte: Autor (2025)

Figura 7.14: Perfis W310x44,5 com diferentes comprimentos e  $D_o/d = 0.8$   $P/D_o = 1.2$



Fonte: Autor (2025)

Figura 7.15: Perfis W310x44,5 com diferentes comprimentos e  $D_o/d = 0,8$   $P/D_o = 1,3$



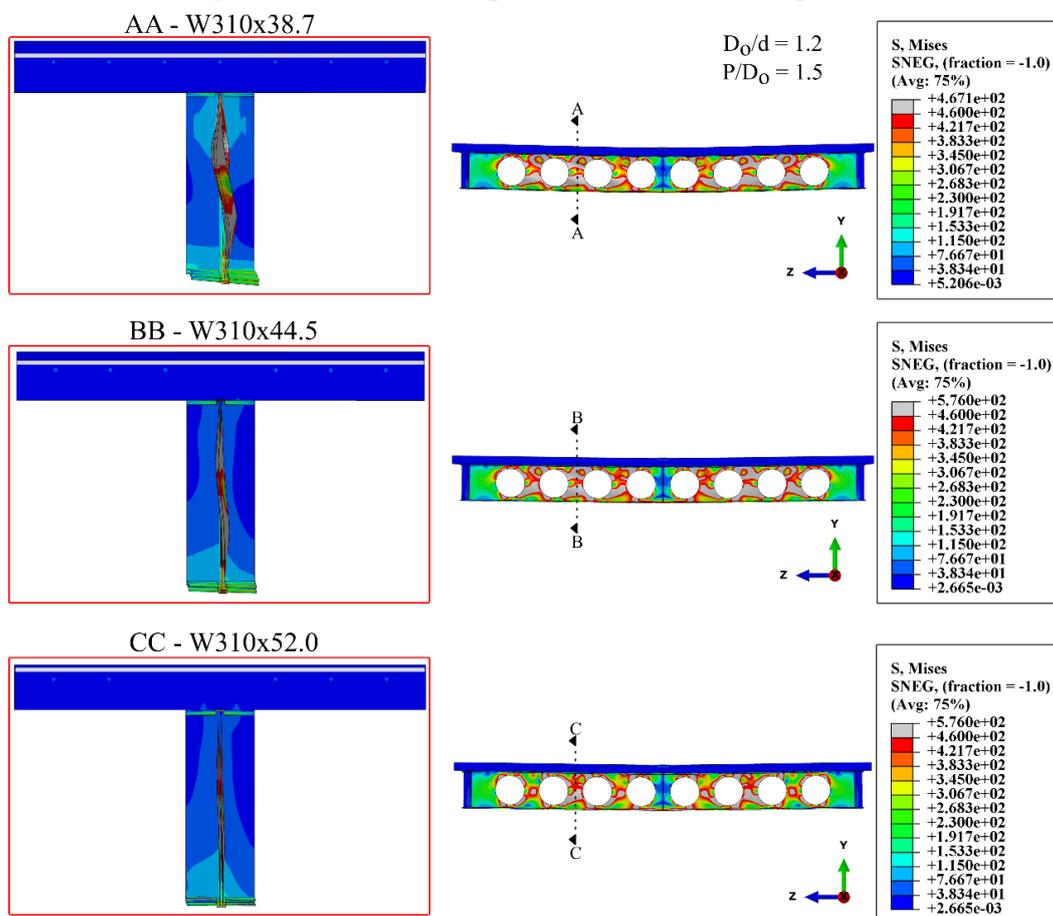
Fonte: Autor (2025)

### 7.3.1.4 Influência da seção transversal

Por fim, a influência das seções nas vigas mistas com aço de alta resistência exerce um impacto significativo na resistência do elemento. Conforme apresentado na Tabela 6.1, as principais diferenças entre os perfis analisados estão associadas à altura e à espessura da seção. A FMA ocorre predominantemente devido à baixa capacidade de resistência nessa região, isso explica o aumento da distância entre os elementos resultar em um aumento da resistência estrutural e, em alguns casos, até mesmo em uma alteração no modo de falha.

Na análise da mudança de seção o aumento da espessura do perfil leva a ganhos expressivos de resistência, uma vez que disponibiliza uma maior área para suportar os esforços solicitantes. Na Figura 7.16, a seção AA evidencia que o deslocamento do montante da alma no perfil W310x38,7 ( $t_f = 9,7$  mm) foi significativamente maior em comparação aos demais perfis. Já na seção CC, observa-se que o perfil W310x52,0 ( $t_f = 13,2$  mm) apresentou um deslocamento praticamente insignificante, com a ruptura ocorrendo predominantemente pelo mecanismo de Vierendeel.

**Figura 7.16:** Corte dos perfis com diferentes espessuras

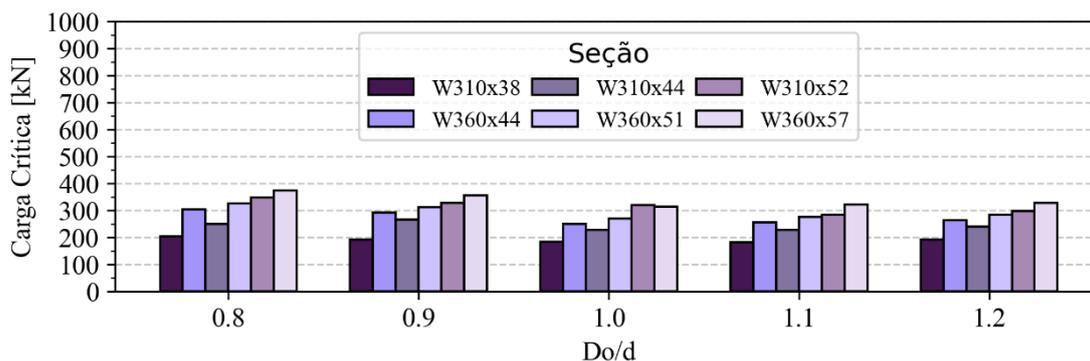


Fonte: Autor (2025)

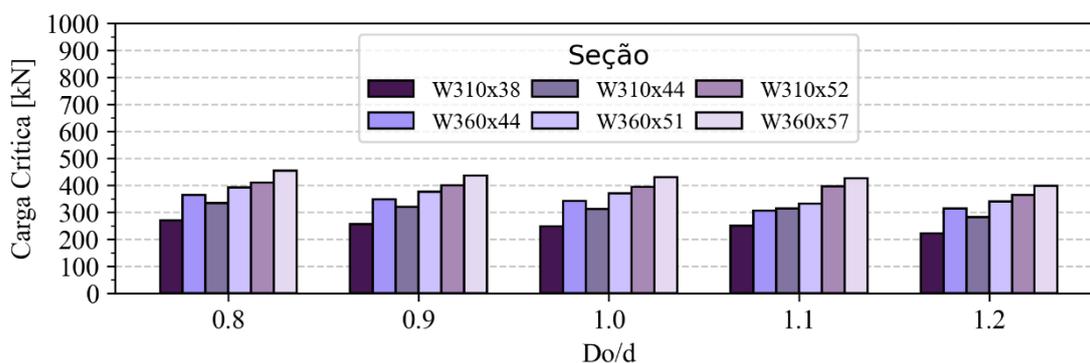
## CAPÍTULO 7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

As resistências observadas para os perfis W310x38,7, W310x44,5 e W310x52,0, todos com comprimento de 5000 mm,  $Do/d = 0,8$  e  $P/Do = 1,5$ , foram de 329,69 kN, 423,16 kN (+28,35%) e 516,05 kN (+56,53%), respectivamente. Esses resultados demonstram um aumento expressivo na resistência estrutural com o acréscimo da espessura do perfil, comportamento que se mantém consistente para outros perfis apresentados na Figura 7.17.

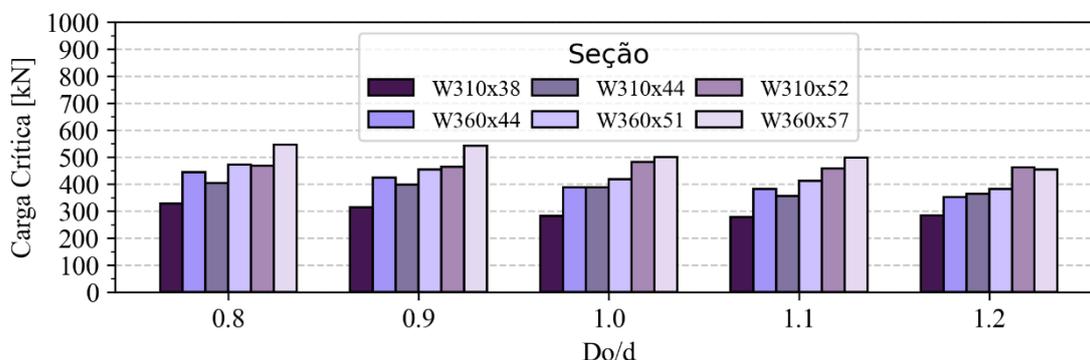
**Figura 7.17:** Influência da espessura em vigas mistas



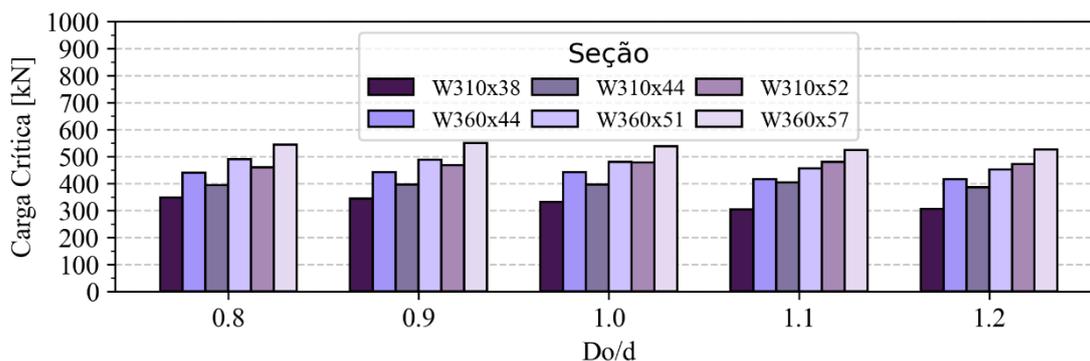
a)  $P/Do = 1,2 / L = 6,0$  m



b)  $P/Do = 1,3 / L = 6,0$  m



c)  $P/Do = 1,4 / L = 6,0$  m



d)  $P/Do = 1,5 / L = 6,0$  m

Fonte: Autor (2025)

Em relação à altura dos perfis, verificou-se que perfis mais altos tendem a apresentar maior resistência estrutural. Embora sejam mais suscetíveis à FMA por conta da esbelteza, o aumento da altura contribui significativamente para a capacidade de carga, conforme ilustrado na Figura 7.16. Dessa forma, ao equilibrar adequadamente a altura e a espessura do perfil, é possível otimizar a resistência do elemento, resultando em uma estrutura mais eficiente e capaz de suportar cargas elevadas.

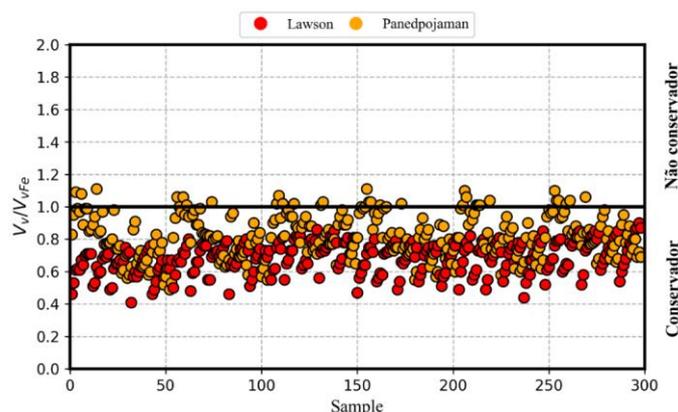
### 7.3.2 Comparação normativa com os resultados numéricos

Após a análise dos modelos simulados, foram selecionadas as vigas mistas que apresentaram instabilidade no montante da alma (298 modelos) para a comparação entre os resultados numéricos e os métodos analíticos. Os valores foram comparados com os modelos analíticos de Lawson et al. (2006), Lawson e Hicks (2011b) (SCI P355), Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu (2014), Ward (1990), Grilo et al. (2018), e a BS EN 1993-1-13(2024).

#### 7.3.2.1 Abordagem da Cortante Global (V)

Os modelos SCI P355 e o Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014) consideram a carga de cisalhamento vertical global como o principal fator determinante. A principal diferença entre eles está no fator de correção “K”, utilizado no cálculo do comprimento efetivo no segundo modelo. A comparação entre os resultados analíticos (Figura 7.18) demonstrou que o modelo de Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014) tem uma maior concordância com os resultados numéricos, evidenciando a eficácia do fator de correção proposto.

**Figura 7.18:** Comparação entre os modelos numéricos e os manuais SCI P355 e o Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014)

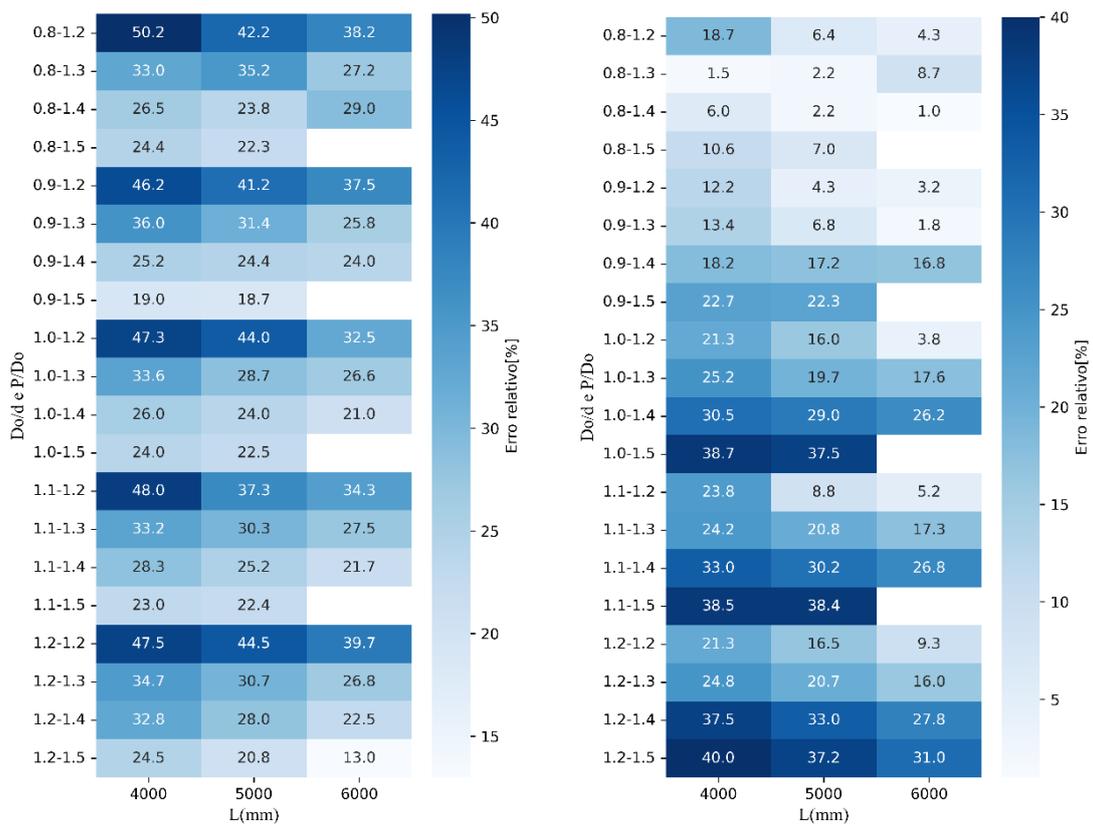


Fonte: Autor (2025)

Ao examinar o erro relativo mostrado nas Figura 7.19 a) e b) percebe-se que o modelo SCI P355 apresenta, na maioria dos casos, erros superiores a 20%, o que compromete sua confiabilidade e limita sua indicação para aplicações em cálculos. A única exceção foi observada em modelos com uma razão de abertura  $Do/d = 1,2$ ,  $P/Do = 1,5$  e comprimento  $L = 6000$  mm, onde o erro médio foi reduzido para 13%.

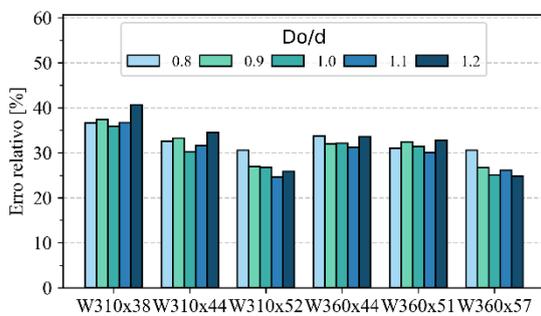
Em contrapartida, o modelo proposto por Panedpojaman, Thepchatri e Limkatanyu, apesar de apresentar algumas divergências, forneceu bons resultados para elementos com menores valores de  $Do/d$  e  $P/Do$ . Nas Figura 7.19 c) e d), nota-se que os resultados obtidos nesses casos foram próximos dos valores de referência, o que torna o modelo adequado para perfis com pequenas aberturas e espaçamentos mais curtos.

Figura 7.19: Erros Relativos

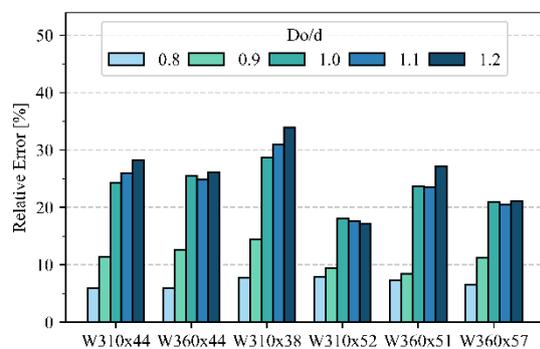


a) Parâmetros do SCI P355

c) Parâmetros do Panedpojaman, Thepchatri and Limkatanyu



b) Perfil I e Relação Do/d SCI P355

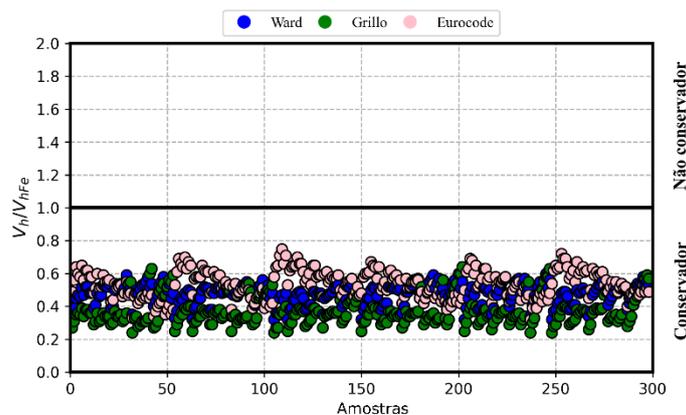


d) Perfil I e Relação Do/d Panedpojaman, Thepchatri and Limkatanyu

### 7.3.2.2 Abordagem da Cortante Horizontal ( $V_h$ )

Como mencionado na seção 5.2, dois métodos foram empregados para a extração de resultados no ABAQUS: “SD31” e “Integrated Output Section”. A análise dos valores extraídos pelo método “SD31” revelou que os modelos analíticos tendem a ser conservadores, conforme ilustrado na Figura 7.20.

**Figura 7.20:** Comparação entre o modelo numérico obtidos pelo SD31, e os modelos de Ward, Grilo e a Eurocode.

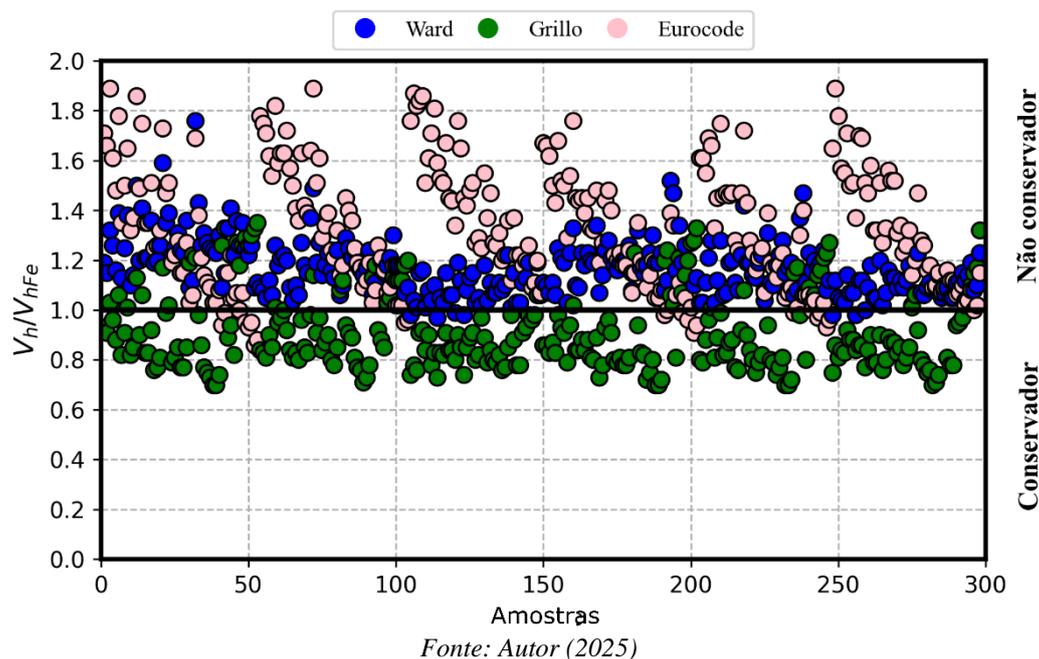


Fonte: Autor (2025)

Ferreira, Martins e Nardin (2021a), ao investigarem vigas mistas celulares de aço e concreto convencional, identificaram percentuais de erro no modelo de Ward (1990) variando entre 43% e 67%, enquanto para o modelo de Grilo et al. (2018), os erros oscilaram entre 33% e 76%. No presente estudo, utilizando materiais de alta resistência, os resultados indicaram percentuais de erro semelhantes. Para o modelo de Ward (1990), os valores variaram entre 36% e 76%, enquanto para o modelo de Grilo et al. (2018), as discrepâncias ficaram entre 40% e 68%. Esses resultados demonstram que, mesmo com o uso de materiais mais resistentes, o comportamento do erro relativo manteve-se próximo ao observado para materiais convencionais. Já a BS EN 1993-1-3 (2024), sendo uma abordagem mais recente e sem dados específicos para uma comparação direta, apresentou percentuais de erro variando entre 25% e 68%.

Por outro lado, ao comparar os valores analíticos com aqueles obtidos diretamente do ABAQUS por meio da função “*Integrated Output Request*”, verificou-se uma maior correspondência com os resultados das simulações numéricas (Figura 7.21). Isso aconteceu pelo fato do modelo do SD31 necessita de muitas simplificações que acabam levando a algumas diferenças do resultado real.

**Figura 7.21:** Comparação entre o modelo numérico obtidos pelo SOF3, e os modelos de Ward, Grillo e a Eurocode.



#### a) Ward (1990)

O modelo de Ward (Figura 7.22 a)) apresentou os menores erros relativos ( $\leq 10\%$ ) para  $Do/d = 0.8$  e  $P/Do = 1.2$  em vigas com comprimentos entre 4000 mm e 6000 mm. Além disso, foi observada boa precisão para  $Do/d = 0.9$  e  $P/Do = 1.5$  nos comprimentos de 4000 mm e 5000 mm. No entanto, de forma geral, razões  $Do/d$  maiores tendem a comprometer a precisão do modelo, enquanto razões  $P/Do$  mais elevadas proporcionam melhores resultados em vigas com 4000 mm e 5000 mm de comprimento.

Na Figura 7.22 d), a comparação entre perfis mais delgados (W310x38.7 e W360x44.0) e perfis mais espessos (W310x52 e W360x57) revela que o erro relativo do modelo diminui conforme a espessura do perfil aumenta. Isso indica que perfis mais robustos produzem resultados mais precisos quando analisados pelo modelo de Ward.

Dessa forma, a utilização desse modelo é mais apropriada para perfis com pequenas razões  $Do/d$ , altas razões  $P/Do$ , comprimentos de 4000 mm e 5000 mm e maior espessura. Em contrapartida, vigas com 6000 mm de comprimento e aberturas na alma maiores demonstraram maior imprecisão nas previsões do comportamento estrutural.

As diferenças nos resultados podem ser atribuídas à sensibilidade das equações aos parâmetros geométricos, especialmente às razões  $Do/d$  e  $P/Do$ , que amplificam os erros em cenários extremos. Além disso, as simplificações empíricas adotadas para os

coeficientes C1, C2 e C3 podem não capturar fielmente o comportamento estrutural, especialmente em materiais de alta resistência, onde efeitos como concentração de tensões se tornam mais pronunciados.

Por fim, destaca-se que o comprimento da viga não é adequadamente considerado pelo modelo, o que limita sua aplicabilidade em estruturas de grande porte.

### **b) Grilo et al. (2018)**

O modelo de Grilo et al. (2018) apresenta desempenho variável dependendo das combinações geométricas e dos comprimentos das vigas. Na Figura 7.22 b) os menores erros relativos ocorrem predominantemente em condições de menores razões  $D_o/d$  e  $P/D_o$ , como nas combinações 0,8-1,3 e 0,8-1,4, especialmente para vigas mais longas ( $L = 6000$  mm). Isso indica que o modelo é mais confiável para menores razões geométricas, onde as tensões na alma são mais distribuídas.

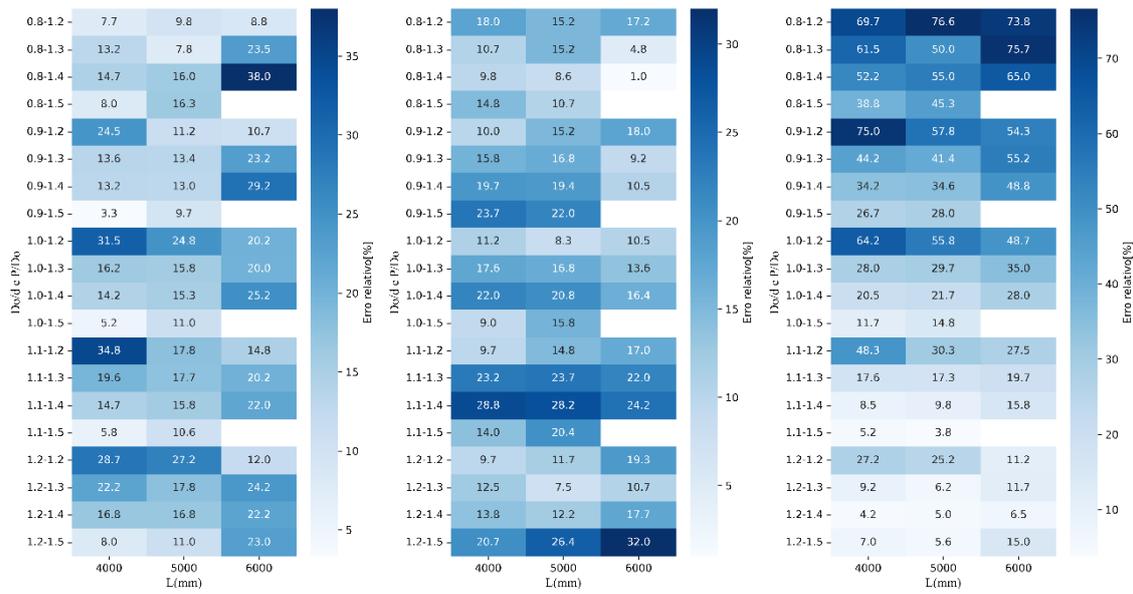
Por outro lado, configurações com maiores razões  $D_o/d$ , como 1,1-1,4 e 1,2-1,5, apresentam erros significativamente mais elevados, ultrapassando 30%. Isso sugere que o modelo de Grilo et al. (2018) é menos adequado para combinações geométricas extremas, revelando limitações no tratamento de instabilidades locais em situações mais críticas. A Figura 7.22 e) reforça essa tendência, mostrando que perfis mais leves, como W310x38, são mais sensíveis a razões  $D_o/d$  elevadas, enquanto perfis mais robustos, como W360x57, apresentam menores erros em uma faixa mais ampla de parâmetros. Assim, o modelo de Grilo é mais recomendado para menores razões  $D_o/d$  e  $P/D_o$ , em vigas longas e perfis robustos.

### **b) Eurocode - BS EN 1993-1-13(2024)**

Conforme o título da norma *Eurocode 3 — Design of Steel Structures, Part 1-13: Beams with Large Web Openings* (Vigas com Grandes Aberturas na Alma) sugere, a precisão dos cálculos melhora para perfis com razões  $D_o/d$  maiores, enquanto para razões menores, a norma se mostrou menos confiável (Figura 7.22 c) e f)). Perfis com  $D_o/d = 0,8$  apresentaram um erro relativo médio elevado, de 73,8%, enquanto aqueles com  $D_o/d = 1,2$  tiveram um erro significativamente menor, chegando a de 4,2%.

Esses dados indicam que a norma é mais eficaz para perfis com razões  $D_o/d$  maiores, mas apresenta limitações ao prever com exatidão o comportamento de perfis com razões  $D_o/d$  reduzidas.

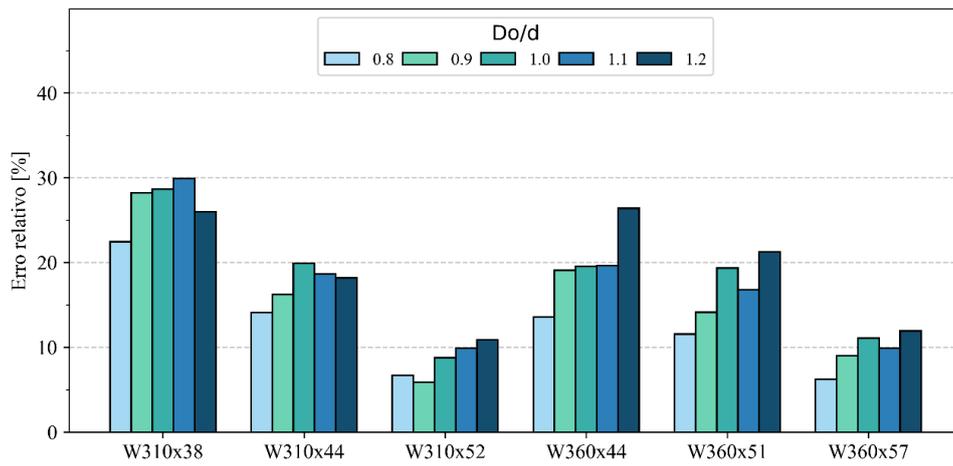
Figura 7.22: Erro Relativo



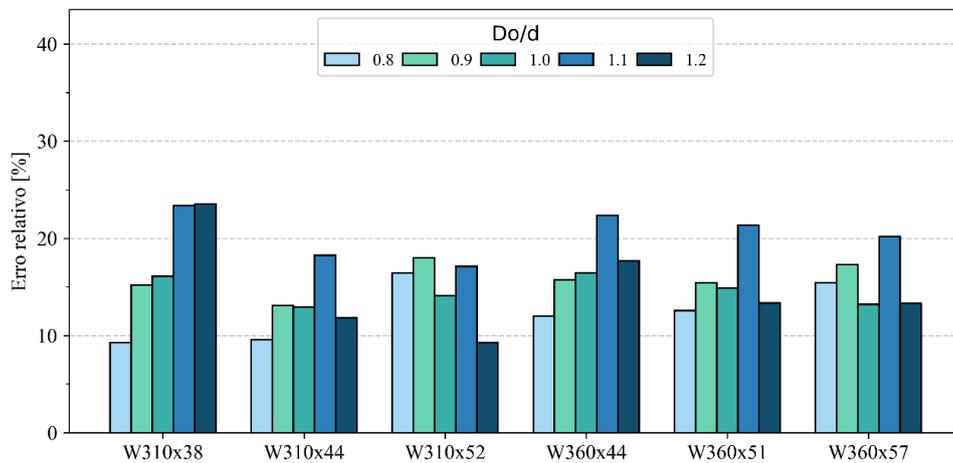
a) Parâmetros - a) Ward (1990)

b) Parâmetros - Grilo et al. (2018)

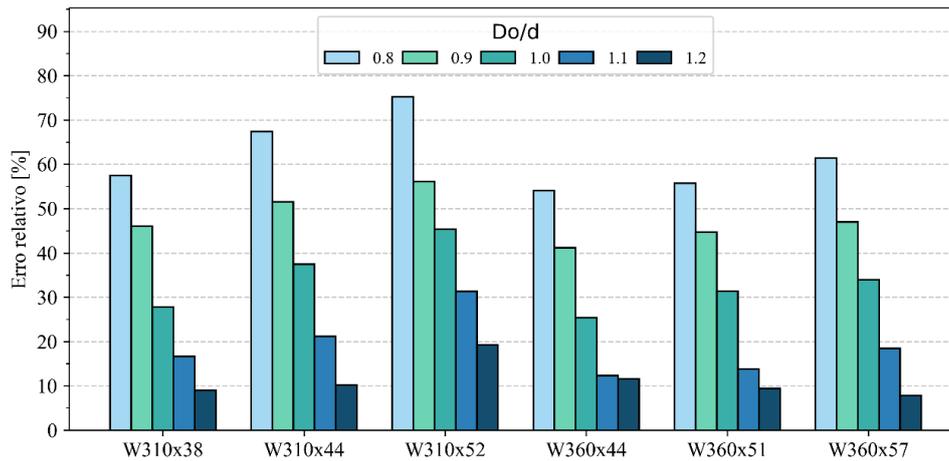
c) Parâmetros - BS EN 1993 1-13(2024)



d) Perfil I e relação  $Do/d$  Ward (1990)



e) Perfil I e relação  $Do/d$  - Grilo et al. (2018)



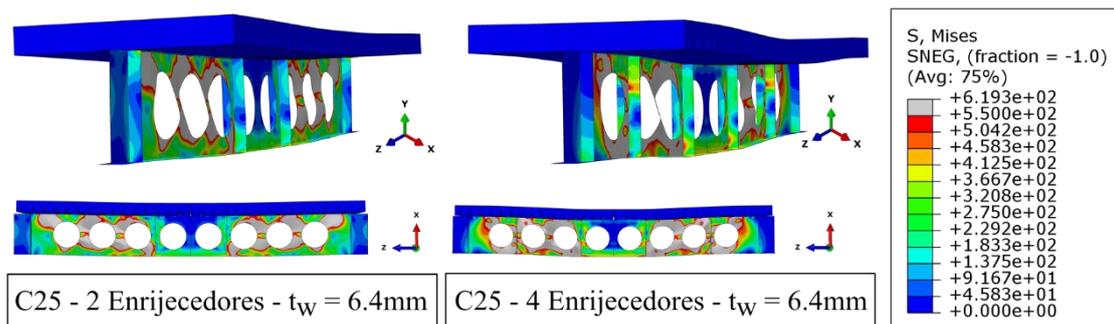
f) Perfil I e relação Do/d - Eurocode - BS EN 1993 1-13(2024)

Fonte: Autor (2025)

## 7.4 ANÁLISE PARAMÉTRICA II

As vigas mistas analisadas apresentaram falha predominante por instabilidade no montante da alma em 100% dos casos (120 modelos). Mesmo com a inclusão de enrijecedores adicionais na alma, o modo de colapso permaneceu associado à FMA. No entanto, a presença dos enrijecedores resultou em um ganho de resistência, evidenciando seu impacto na capacidade estrutural das vigas. Os valores de carga última se encontram no APÊNDICE D.

Figura 7.23: Modelo de Falha apresentado



Fonte: Autor (2025)

### 7.4.1 Influência das propriedades mecânicas dos materiais, espessura da alma e enrijecedores no desempenho das vigas mistas celulares

A variação da resistência dos materiais, da espessura da alma e a inclusão de enrijecedores influenciaram diretamente a capacidade estrutural das vigas mistas. A interação entre esses fatores afetou tanto a resistência final quanto o comportamento

frente às instabilidades, ressaltando sua importância na otimização do desempenho do sistema.

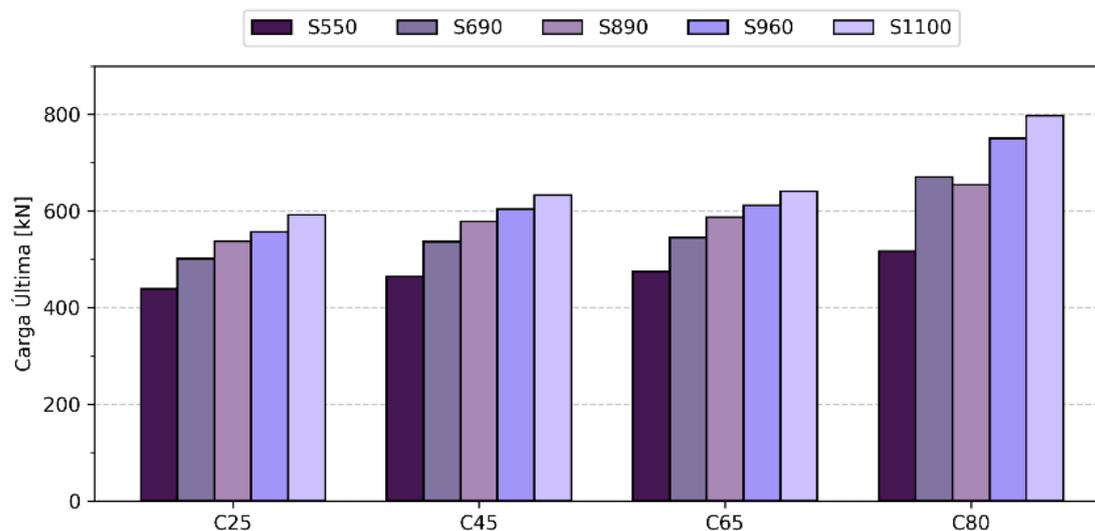
### 7.4.1.1 Aço

A evolução da carga última em função da classe do aço confirma um crescimento progressivo da resistência estrutural, porém com ganhos percentuais reduzidos à medida que se avança para aços de maior resistência. Os valores médios obtidos indicam um aumento expressivo na transição de S550 para S690 (+20,48%), enquanto as mudanças seguintes apresentam acréscimos menores: S690 para S890 (+8,71%), S890 para S960 (+6,65%), e S960 para S1100 (+7,45%). Isso demonstra que, apesar da melhoria contínua na capacidade de carga, o impacto do aumento da classe do aço vai se tornando menos significativo.

A Figura 7.24 reforça essa tendência, ilustrando a progressão ascendente da carga última para diferentes classes de aço. Nota-se que o comportamento se mantém uniforme independentemente da resistência do concreto, indicando que o aço tem um papel predominante na evolução da resistência estrutural. O crescimento, porém, ocorre em patamares cada vez menores, sugerindo que o ganho relativo de resistência se estabiliza após certo limite.

Esse comportamento deve ser considerado na escolha da classe do aço, pois a transição para materiais de resistência superior precisa ser avaliada em termos de custo-benefício. Embora o S1100 apresente a maior carga última, o acréscimo em relação ao S960 é relativamente pequeno, o que pode influenciar a decisão entre otimizar o desempenho estrutural ou priorizar a viabilidade econômica da aplicação.

**Figura 7.24:** Comportamento do aço para a resistência última nos modelos  $t_w = 6,4\text{mm}$  e 2 enrijecedores.



*Fonte: Autor (2025)*

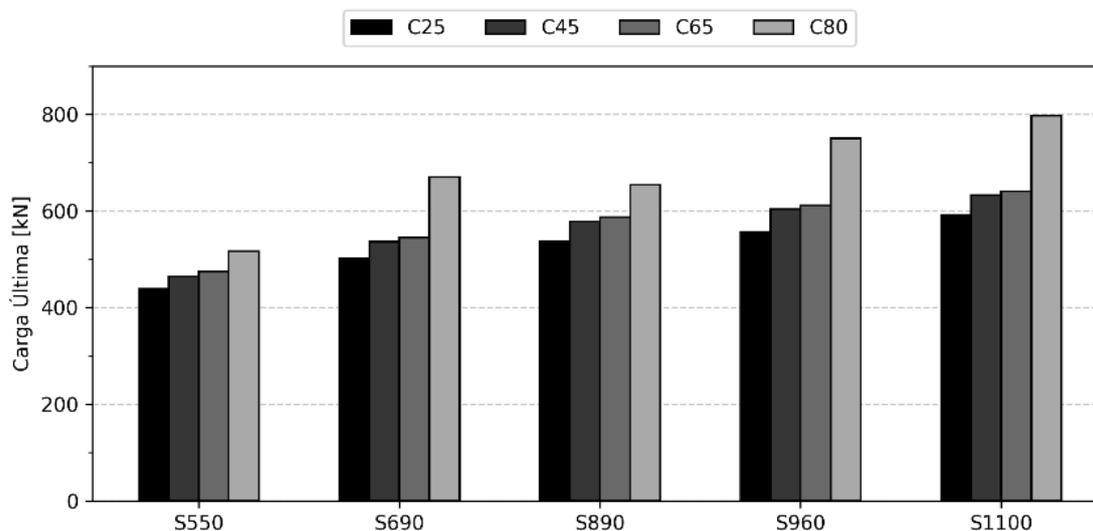
#### 7.4.1.2 Concreto

A resistência do concreto exerce um impacto significativo na capacidade estrutural, mas seu efeito não é uniforme ao longo das diferentes classes analisadas. Os valores médios de carga última obtidos indicam que a transição entre C25 e C45 resulta em um aumento de 5,6%, enquanto entre C45 e C65 esse crescimento é ainda menor, cerca de 2,2%. No entanto, ao avançar para C80, o ganho se torna expressivo, alcançando 17,7% em relação ao C65.

Essa variação nos ganhos sugere que o concreto atua como um fator limitante em certos níveis de resistência, especialmente quando combinado com aços de alta resistência. Para concretos de resistência intermediária, o impacto no aumento da carga última é moderado, o que indica que, nesses casos, a estrutura já está sendo governada majoritariamente pelo comportamento do aço. O crescimento acentuado ao utilizar C80, por outro lado, indica que, a partir desse nível, o concreto passa a exercer um papel mais relevante na rigidez e na capacidade estrutural, maximizando a resistência global do sistema.

Nota-se na Figura 7.25 que essa tendência de crescimento acontece em geral para todas as resistências de aços investigadas, sendo mais acentuado na classe de aço S1100.

**Figura 7.25:** Comportamento do concreto para a resistência última nos modelos com  $t_w = 6,4\text{mm}$  e 2 enrijecedores.



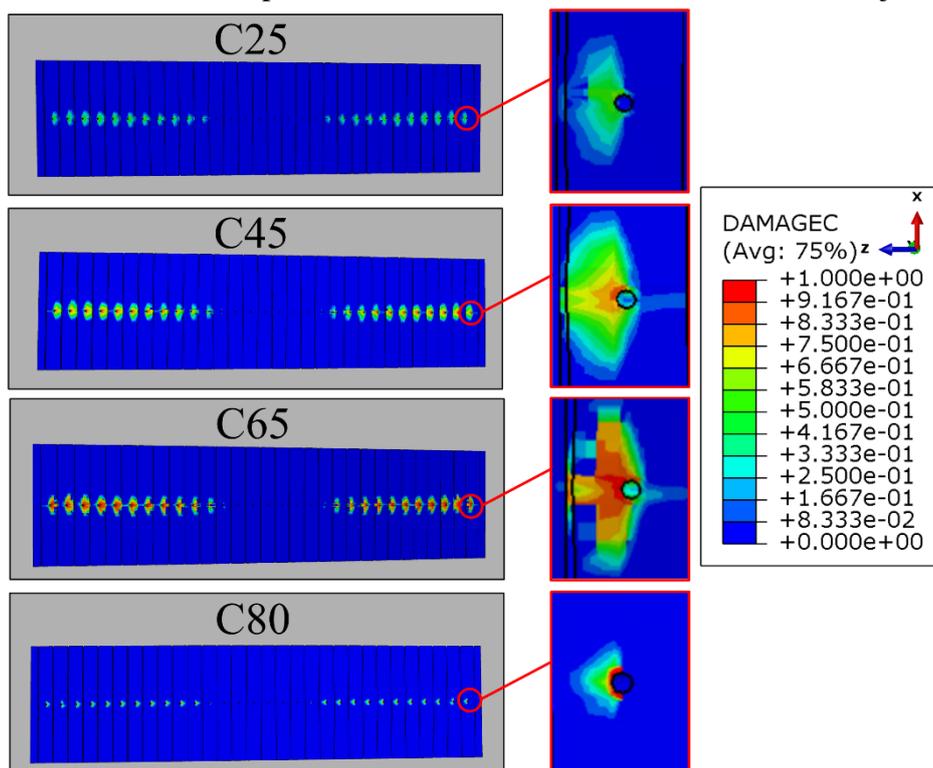
Fonte: Autor(2025)

Ao analisar o dano no concreto, observou-se que o aumento da sua resistência intensificou os danos na laje. Isso ocorre porque, antes de transferir completamente as tensões para o perfil celular, a laje suporta uma parcela maior da carga aplicada, postergando a instabilidade do perfil. Esse efeito pode ser identificado na Figura 7.26, onde a distribuição das tensões no concreto evidencia esse fenômeno.

Esse comportamento também impactou diretamente os conectores de cisalhamento, que passaram a ser mais exigidos à medida que a laje suportava cargas maiores antes da falha do perfil. Com o aumento da resistência do concreto, os conectores foram submetidos a esforços mais intensos, como destacado em verde na Figura 7.27. No caso do concreto C80, essa solicitação tornou-se tão elevada que levou ao dobramento de alguns conectores, evidenciado em azul na mesma figura.

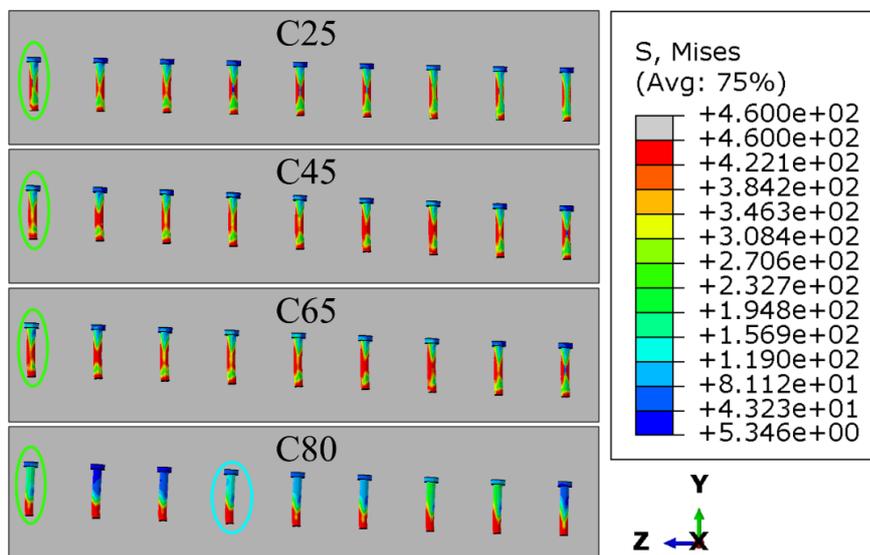
Portanto, ao utilizar concretos com resistência superior a C80, torna-se essencial reforçar os conectores, pois a maior carga absorvida pela laje antes da falha do perfil amplifica os esforços nesses elementos. Caso não sejam devidamente dimensionados, podem sofrer deformações excessivas ou até ruptura, comprometendo a conexão entre laje e perfil celular.

**Figura 7.26:** Dano a compressão no concreto – S690,  $t_w = 6,4\text{mm}$  e 2 enrijecedores.



Fonte: Autor(2025)

**Figura 7.27:** Tensão nos conectores – S690,  $t_w = 6,4\text{mm}$  e 2 enrijecedores.



Fonte: Autor (2025)

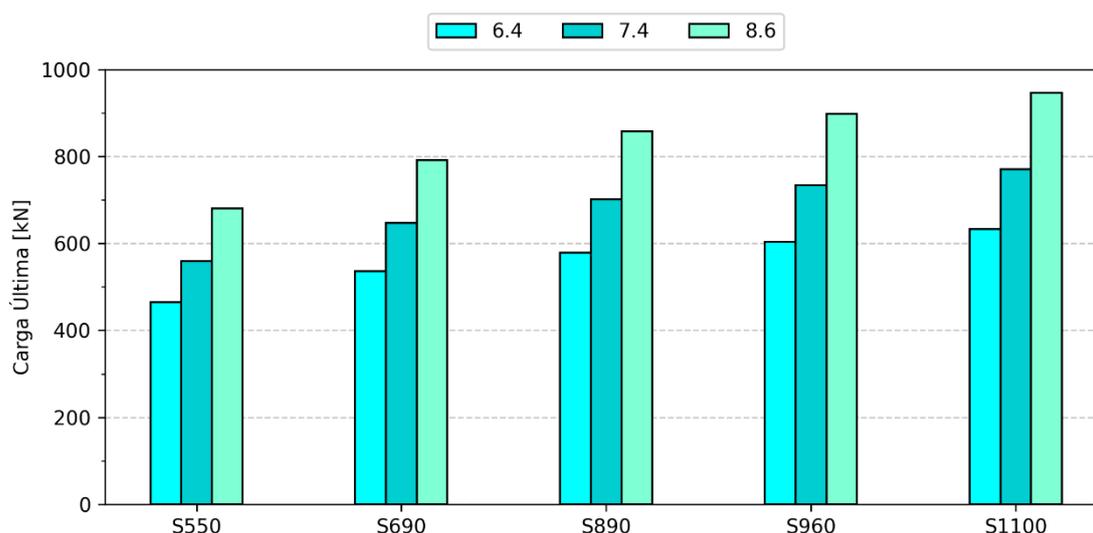
#### 7.4.1.3 Espessura da alma

O aumento da espessura de 6,4 mm para 7,4 mm resulta em um acréscimo de 18,2% na carga última, enquanto a transição de 7,4 mm para 8,6 mm proporciona um ganho ainda mais expressivo de 20,8%. Esse comportamento é esperado, pois seções mais

espessas apresentam maior resistência à flexão e ao cisalhamento, reduzindo os efeitos de instabilidade estrutural e aumentando a capacidade de carga.

Na Figura 7.28 é notável o crescimento linear à medida que se aumenta a espessura da alma. Esse comportamento se estende para todos os modelos simulados, garantindo que a relação entre carga última e espessura da alma são diretamente proporcionais.

**Figura 7.28:** Carga última - modelo C45 com 2 enrijecedores



Fonte: Autor (2025)

Embora espessuras maiores garantam melhor desempenho estrutural, elas também resultam em maior consumo de material, o que pode impactar o peso próprio da estrutura e os custos de fabricação. Dessa forma, a escolha da espessura ideal deve equilibrar a necessidade de resistência com a viabilidade construtiva, garantindo um dimensionamento eficiente sem excessos desnecessários.

#### 7.4.1.4 Enrijecedores

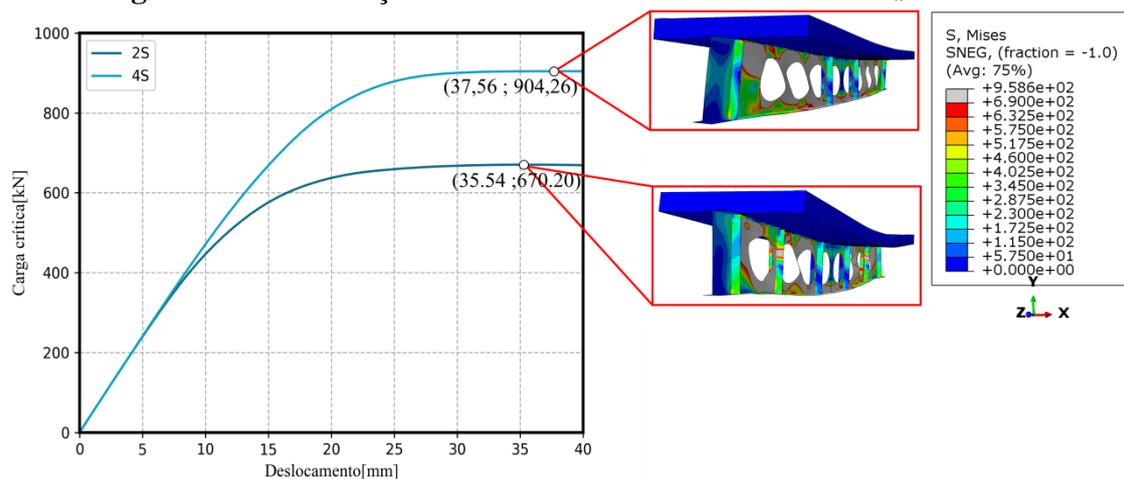
A presença de enrijecedores influencia diretamente a resistência estrutural, refletindo-se nos valores médios de carga última obtidos. Os modelos com 4 enrijecedores (4S) apresentaram uma carga última média 31,3% superior àqueles com 2 enrijecedores (2S), indicando um aumento expressivo na capacidade de carga ao adicionar mais elementos de reforço.

O ganho proporcionado pela configuração 4S ocorre devido à maior rigidez estrutural, que melhora a distribuição das tensões ao longo da peça, reduzindo efeitos locais de instabilidade e deformação. Esse comportamento justifica o aumento

significativo na carga última, especialmente em sistemas onde a flexibilidade da estrutura pode ser um fator limitante.

Entretanto, apesar do benefício estrutural evidente, a adoção de mais enrijecedores, assim como a espessura, precisa ser analisada em termos de viabilidade construtiva e eficiência material. O aumento da rigidez pode ser vantajoso em determinadas aplicações, mas também pode implicar em custos adicionais de fabricação e montagem.

**Figura 7.29:** Diferença da resistência modelo C80 – S690 –  $t_w = 8.6\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

## 7.4.2 Comparação normativa com os resultados numéricos

Assim como na primeira análise paramétrica, todos os modelos foram analisados individualmente, selecionando-se aqueles que apresentaram falha por FMA. Nesse caso, verificou-se que todos os 120 modelos analisados exibiram esse comportamento, permitindo uma comparação direta com os métodos analíticos.

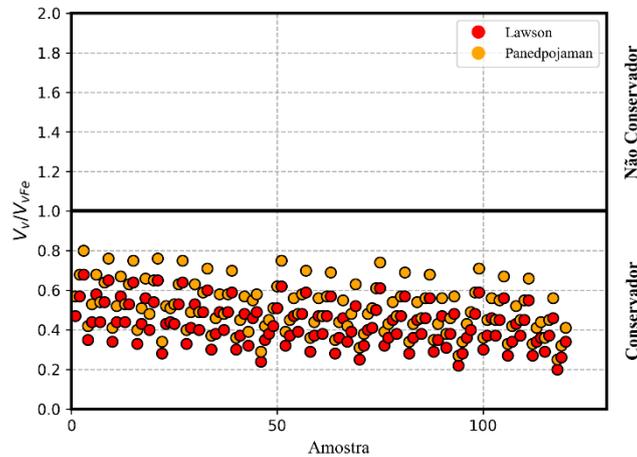
### 7.4.2.1 Abordagem da cortante Global (V)

Conforme mencionado anteriormente, os modelos que utilizam a cortante global como parâmetro para determinar a carga última na falha por FMA são o SCI P355 e o de Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014). A Figura 7.30 evidencia que ambos os modelos apresentam um comportamento conservador, subestimando a resistência real da estrutura. Isso indica que os valores calculados por esses métodos ficam abaixo da capacidade efetiva suportada pelos elementos analisados.

Ao calcular o erro relativo do modelo SCI P355, observa-se na Figura 7.31 que os resultados apresentam uma discrepância de até 80% em relação aos valores obtidos na simulação numérica, evidenciando sua baixa precisão na estimativa da resistência

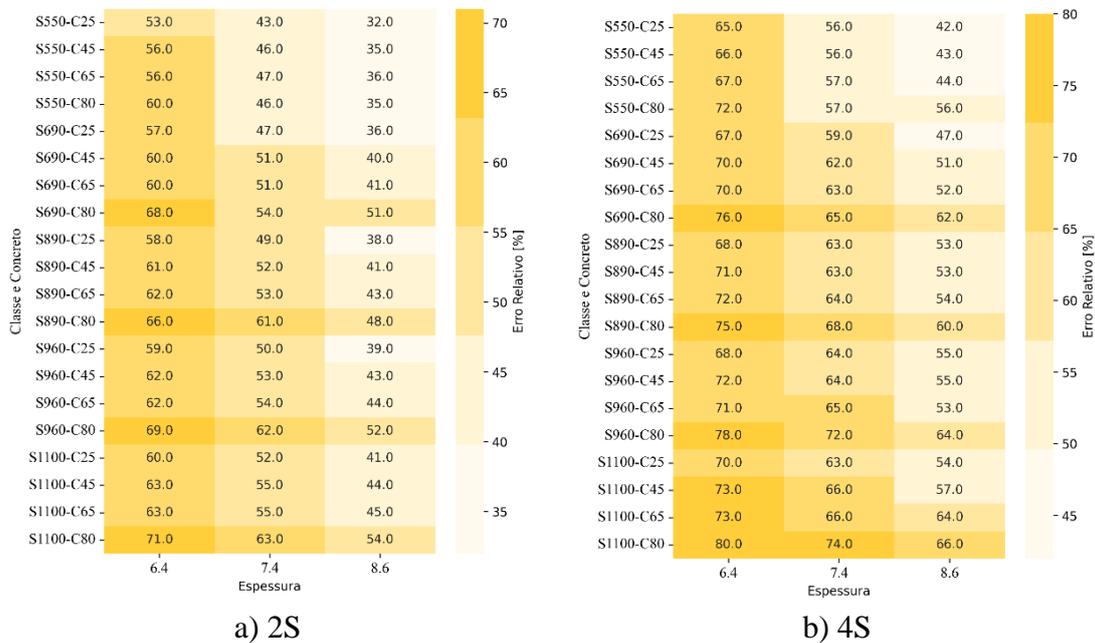
estrutural. Essa diferença significativa compromete a confiabilidade do modelo, tornando sua aplicação inadequada para a previsão da falha por FMA em vigas mistas celulares.

**Figura 7.30:** Comparação entre os modelos numéricos e os manuais SCI P355 e o Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014)



Fonte: Autor (2025)

**Figura 7.31:** Erro relativo do modelo da SCI P355 - (2S)

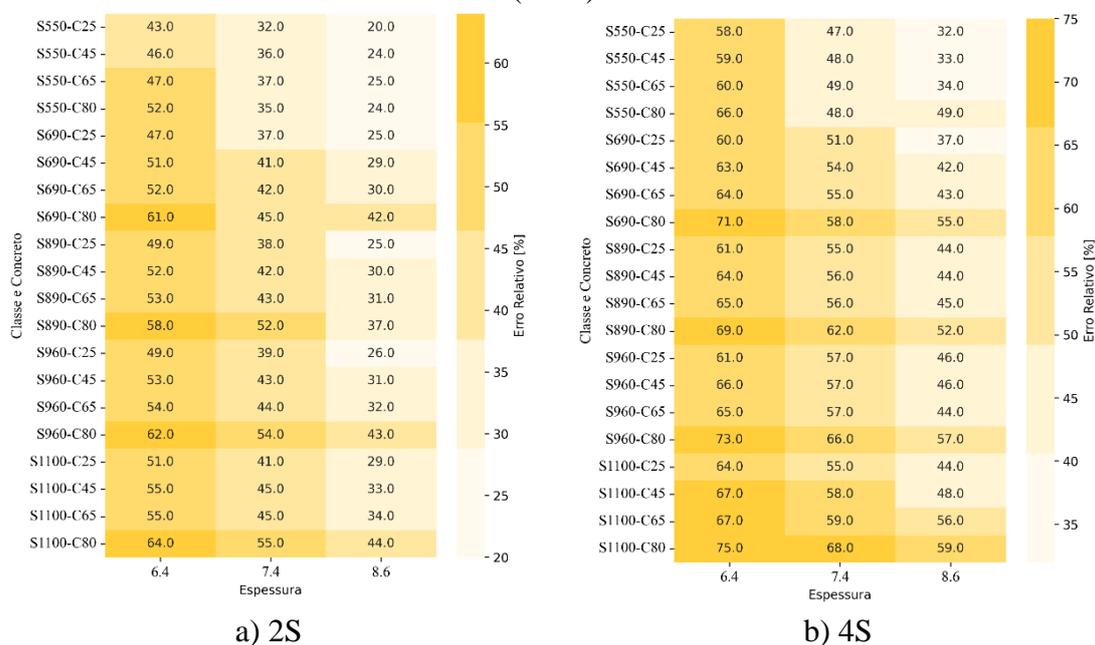


Fonte: Autor (2025)

Para o modelo de Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014), o comportamento foi semelhante, com o erro relativo em relação à estrutura simulada permanecendo acima de 20% em todos os casos. Há uma tendência de aproximação dos valores esperados apenas para perfis com espessuras mais elevadas e materiais de menor resistência. No entanto, conforme a Figura 7.32 ilustra, a redução da espessura, a inclusão

de enrijecedores e o aumento da resistência dos materiais ampliam significativamente a discrepância, podendo resultar em erros de até 75% em relação aos valores previstos.

**Figura 7.32:** Erro relativo do modelo do Panedpojaman, Thepchatri E Limkatanyu (2014)



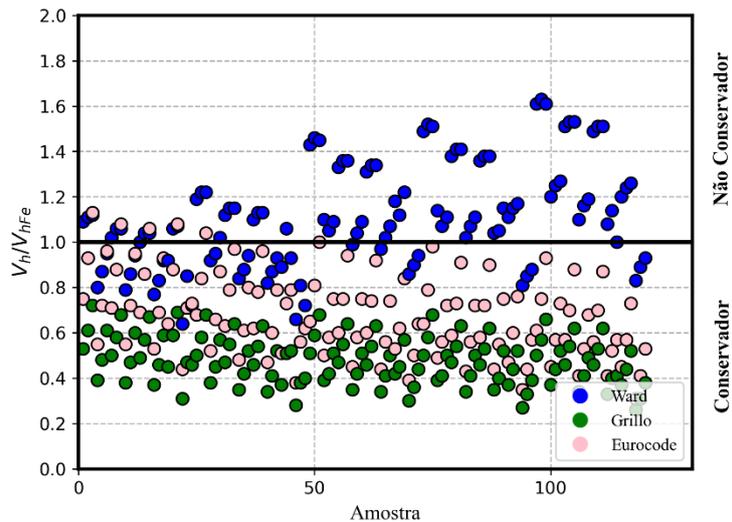
Fonte: Autor (2025)

#### 7.4.2.2 Abordagem da Cortante Horizontal ( $V_h$ )

Os modelos extraídos pelo método SD31 apresentaram uma maior proximidade com os resultados esperados (Figura 7.33). No entanto essa precisão foi válida somente para os modelos de Ward já que o método do SD31 se baseia nas mesmas teorias do manual de Ward (1990). A precisão para os outros modelos se torna inviável, por exemplo, o modelo de Grilo apresentou um erro médio de 52,0% e o modelo da Eurocode ficou com um erro de 32,8%. Somente o modelo de Ward que apresentou um erro relativo de 20,0%. Desta maneira, foi levado em consideração o método do SOF3 como resultado principal para comparação detalhada como foi na Paramétrica I.

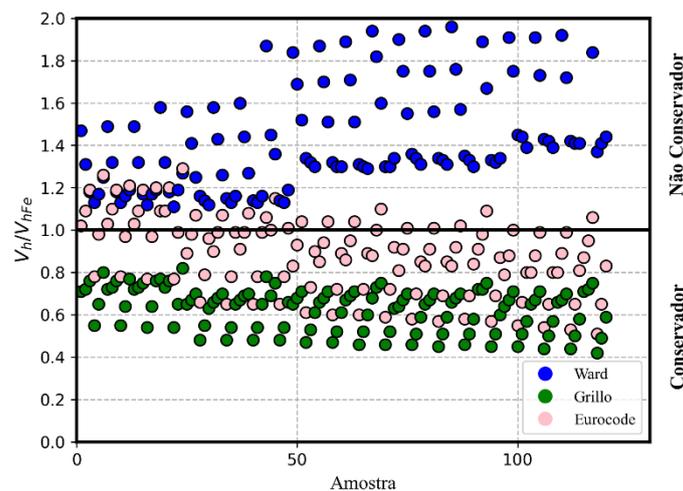
A comparação dos resultados utilizando o novo método mostrou que os modelos da BS EN 1993-1-13(2024) e de Grilo *et al.* (2018) tiveram melhor precisão na previsão das respostas. No entanto, conforme ilustrado na Figura 7.34, o modelo de Ward (1990) apresentou um deslocamento para a zona não conservadora. Além disso, a distribuição dos resultados tornou-se mais uniforme para todos os modelos.

**Figura 7.33:** Comparação entre os modelos numéricos e os resultados obtidos por Ward (1990), Grilo et al. (2018), e a BS EN 1993-1-13(2024) – SD31



Fonte: Autor (2025)

**Figura 7.34:** Comparação entre os modelos numéricos e os resultados obtidos por Ward (1990), Grillo et al. (2018), e a BS EN 1993-1-3(2024) – SOF3

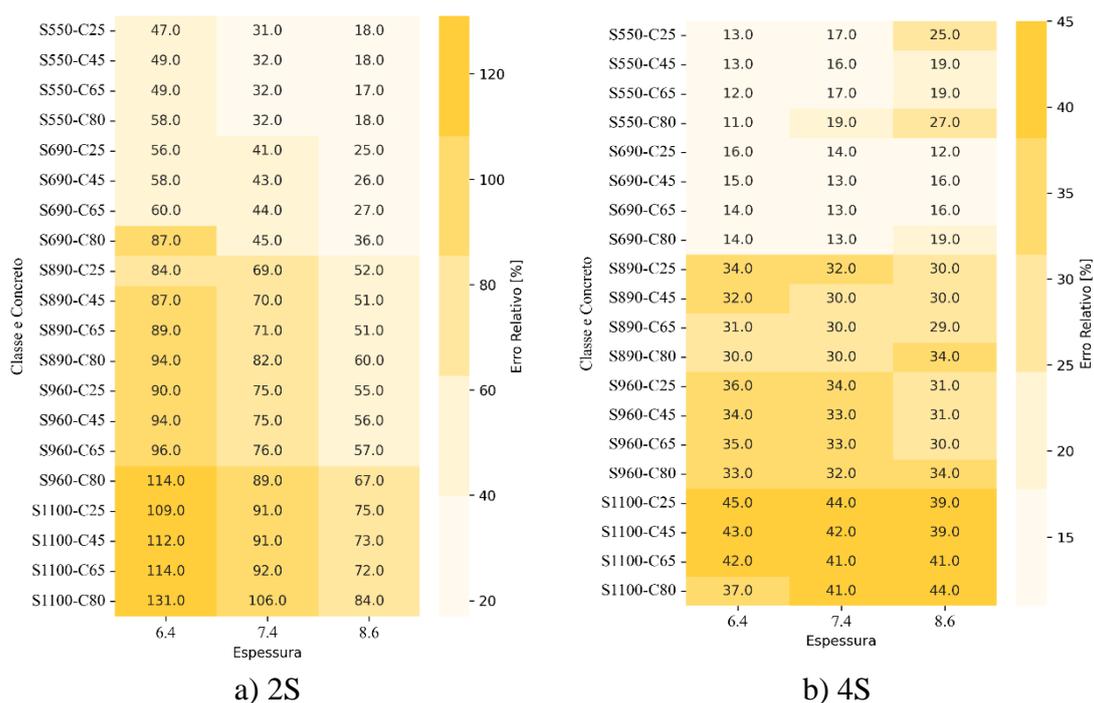


Fonte: Autor (2025)

**a) Ward (1990)**

Como mencionado, o modelo de Ward (1990) apresentou os maiores desvios em relação ao modelo numérico. No entanto, apesar dos erros, a aplicação de coeficientes de minoração permitiria que as previsões para o aço S550 e perfis de alta espessura se aproximem dos resultados obtidos na simulação numérica, conforme ilustrado na Figura 7.35. Já para a aplicação em aços de alta resistência e com baixas espessuras a resposta não é satisfatória, chegando a erros relativos superiores a 100%.

**Figura 7.35:** Erro relativo do modelo de Ward (1990) – SOF3

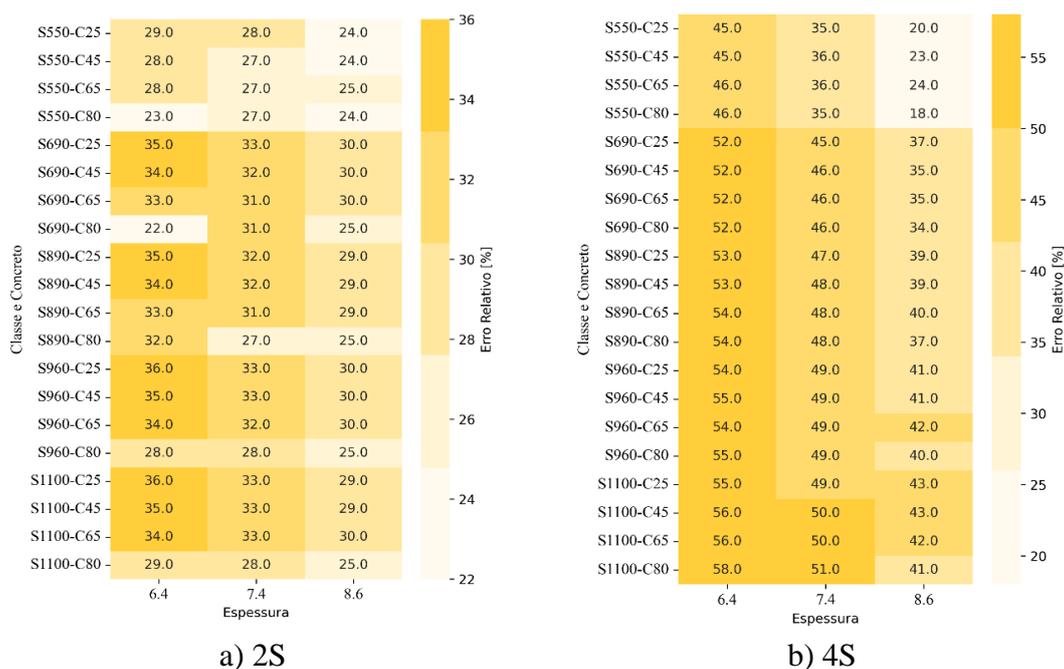


Fonte: Autor (2025)

**b) Grilo et al. (2018)**

O modelo de Grilo et al. (2018) apresentou uma leve melhoria em comparação com o SD31, tornando-se menos conservador. No entanto, conforme indicado na Figura 7.36, ainda se mostra impreciso para aços de alta resistência, não representando adequadamente seu comportamento estrutural.

**Figura 7.36:** Erro relativo do modelo de Grilo et al. (2018) – SOF3

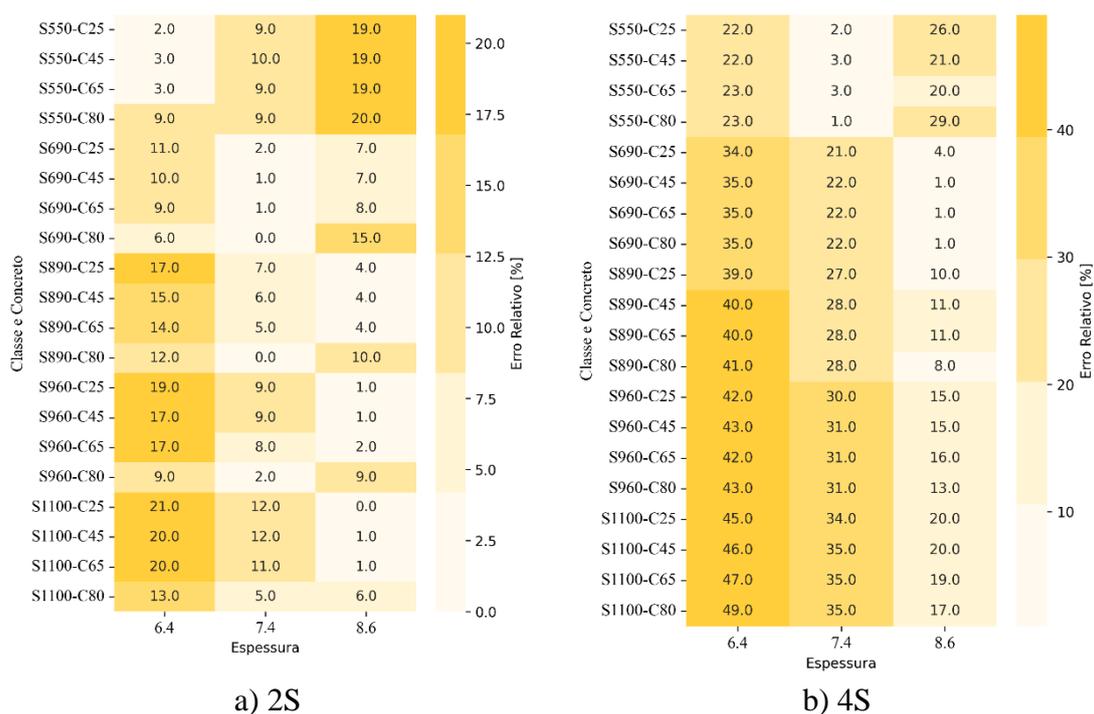


Fonte: Autor (2025)

c) Eurocode - BS EN 1993-1-13(2024)

A Figura 7.37 (a), correspondente ao modelo 2S, mostra que os erros relativos são consideravelmente menores na maioria das configurações. Um aspecto notável é que, para espessuras mais elevadas (7.4 mm e 8.6 mm), os erros tendem a ser ainda menores, para classes de aço mais altas. Nota-se que até mesmo para aços de alta resistência a resposta do modelo foi satisfatória.

**Figura 7.37:** Erro relativo do modelo de BS EN 1993-1-13(2024) – SOF3



Fonte: Autor (2025)

A relação entre os valores normativos e os modelos analisados sugere que a configuração 2S é a que melhor corresponde às exigências da norma, especialmente para combinações intermediárias de resistência do aço e concreto. No entanto, a configuração 4S apresenta um desempenho menos adequado, possivelmente devido à influência dos enrijecedores no comportamento global da estrutura, que pode não estar completamente refletida na abordagem normativa.

## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### 8.1 CONCLUSÃO

Este estudo investigou o comportamento de vigas mistas celulares de aço e concreto de alta resistência, incorporando a inovação sustentável da substituição de 50% do agregado miúdo natural por agregado reciclado de louças sanitárias. Os resultados experimentais mostraram que o concreto obteve um excelente desempenho estrutural, atingindo uma resistência à compressão de 72,8 MPa e módulo de elasticidade de 34,6 GPa, evidenciando sua viabilidade para aplicações estruturais.

Na primeira etapa paramétrica, a geometria mostrou influência direta na capacidade de carga e nos modos de falha observados. Relações  $Do/d$  e comprimentos maiores reduziram a resistência estrutural, enquanto a relação  $P/Do$  mais elevada e o aumento da espessura da alma favoreceram a estabilidade e a resistência das vigas. A análise dos modos de falha indicou predominância da FMA em  $P/Do$  menores e do MV em  $P/Do$  maiores, destacando a importância do espaçamento e da disposição das aberturas na definição do comportamento estrutural.

A comparação com os modelos normativos revelou que o SCI P355 apresentou limitações significativas, especialmente em perfis mais delgados. O modelo de Panedpojaman et al. (2014) demonstrou melhor desempenho para relações para  $Do/d$  e  $P/Do$  baixos, enquanto o modelo de Grilo et al. (2018) mostrou-se mais confiável em configurações com menores razões  $Do/d$  e  $P/Do$ . A Eurocode 3 se destacou para perfis com grandes aberturas, particularmente com  $Do/d = 1,2$ .

Na segunda etapa paramétrica, observou-se que o aumento da resistência do aço (de S550 a S1100) elevou progressivamente a capacidade de carga. O concreto apresentou impacto mais significativo apenas na transição de C65 para C80, onde passou a influenciar também a rigidez global e a atuação dos conectores de cisalhamento. Aumentos na espessura da alma proporcionaram ganhos diretos de resistência e mitigação da instabilidade, enquanto a adição de enrijecedores elevou em até 31% a capacidade resistente das vigas.

Por fim, a análise normativa revelou que o modelo de Ward (1990) apresentou um comportamento razoável em perfis espessos e com aço S550. Já o Grilo et al. (2018) mostrou-se impreciso para aços de alta resistência tendo erros acima de 20%. A Eurocode 3 apresentou os melhores resultados para a configuração com 2 enrijecedores e perfis robustos, mas apresentou limitações ao representar configurações com múltiplos enrijecedores.

De maneira geral, o estudo comprovou que a combinação de materiais de alta resistência com agregado reciclado é técnica e ambientalmente viável. Embora as normas analisadas forneçam estimativas conservadoras em alguns cenários, ainda são necessárias calibrações específicas para capturar com precisão o comportamento de sistemas com alto desempenho estrutural e soluções mais sustentáveis.

### **8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para a complementação das investigações realizadas no presente estudo, verifica-se a possibilidade do desenvolvimento de trabalhos futuros com as seguintes abordagens:

- Gerar a curva tensão x deformação para o concreto investigado de maneira experimental;
- Aplicação de redes neurais e aprendizado de máquina para prever com maior precisão o comportamento estrutural dessas vigas;
- Estudo detalhado combinando diferentes classes de aço e concreto com ampla variação geométrica para compreender melhor o comportamento desse sistema estrutural (vigas mistas alveolares).
- Desenvolvimento de ensaios físicos complementares para validar e aprimorar os modelos numéricos utilizados nesta pesquisa.

# **9 REFERÊNCIAS**

ABDULLAH, B.; ALIAS, S. K.; JAFFAR, A.; RASHID, A. A.; RAMLI, A. Mechanical properties and microstructure analysis of 0.5% niobium alloyed ductile iron under austempered process in salt bath treatment. **ICMET 2010 - 2010 International Conference on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings**, n. Icmct, p. 610–614, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro. 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 1: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro. 2017a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado**. Rio de Janeiro. 2017b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:2017 - Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro. 2017c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. Rio de Janeiro. 2024a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações**. Rio de Janeiro. 2024b.

ALGUHI, H. A. S. **Nonlinear Analysis Of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete Ground Slabs**. Thesis (Doctor of Philosophy). King Saud University, 2016.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Castellated and Cellular Beam Design**. Hope, AR: AISC. 2016.

BADKE-NETO, A.; CALENZANI, A. F. G.; FERREIRA, W. G. Study of methods for the design of cellular composite steel and concrete beams. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 6, p. 843–859, 2015.

BAN, H.; BRADFORD, M. A. Flexural behaviour of composite beams with high strength steel. **Engineering Structures**, v. 56, p. 1130–1141, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.06.040>>.

BARALDI, L. World sanitaryware exports and imports. **Ceramic world review**, p. 58–69, 2023.

BARBOSA, W. C. de S. **Estudo de conectores de cisalhamento em barras de aço para vigas mistas de aço e concreto**. 2017. University of Brasília (PhD thesis), 2017. Disponível em: <<http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/23188>>.

BENEDETTY, C. A.; KRAHL, P. A.; GOES, C. M. W.; DE ALMEIDA, L. C.; TRAUTWEIN, L. M.; SILVA, F. A. Effects of fiber content, inclination angle, and casting point on the fiber-matrix interaction of High-Strength Fiber-Reinforced Self Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 398, n. June, 2023.

BENEDITO, A. V. **ESTUDO NUMÉRICO DA MUDANÇA DO PADRÃO DE FALHA EM VIGAS DE CONCRETO PELA VARIAÇÃO DO VOLUME DE FIBRAS** Orientador: Leandro Vanalli. 2023. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá., 2023. Disponível em: <<http://www.pcv.uem.br/documentos/dissertacao-de-mestrado/andre-vitor-dissertacao.pdf/view>>.

BENEDITO, A. V.; TORRES, B. A. C.; SILVA, R. M. de C.; KRAHL, A. P.; CARDOSO, D. C. T.; SILVA, F. de A.; MARTINS, C. H. Effects of Niobium Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Microalloyed Steels: A Review. **Buildings**, v. 14, n. 5, p. 1–18, 2024.

BJORHOVDE, R. Columns-from theory to practice. **ENGINEERING JOURNAL-AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION INC**, v. 25, n. 1, p. 21–34, 1988.

BJORHOVDE, R.; BROZZETTI, J.; ALPSTEN, G. A.; TALL, L. Residual stresses in thick welded plates. **WELD J--MIAMI FLA--**, v. 51, n. 8, p. 292, 1972.

CAO, X.; WANG, H.; CHEN, Y.; SHEN, S.; TAO, Z.; YOU, M.; KIM, S. E.; KONG, Z. Experimental and numerical study of residual stresses in 550 MPa high strength steel welded angle sections. **Structures**, v. 56, n. July, p. 104907, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104907>>.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 82, n. 6, p. 797–804, 1985.

CEN. BS EN 1993-1-13, Eurocode 3 Part 1-13: Beams with large web openings, Brussels, Belgium. 2024.

CHACÓN, R.; SERRAT, M.; REAL, E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. **Thin-Walled Structures**, v. 53, p. 15–25, 2012.

CHAN, R.; MOY, C. K. S.; GALO BARDES, I. Numerical and analytical optimisation of functionally graded concrete incorporating steel fibres and recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 356, n. October, p. 129249, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129249>>.

CHEN, L.; QIANG, X.; SUN, P.; ZHANG, S.; JIANG, X. Experimental and theoretical study on flexural behavior of prestressed concrete beams strengthened by CFRP tendons with external unbonded retrofit system. **Journal of Building Engineering**, v. 89, n.

February, 2024.

CHO, S. H.; REDWOOD, R. G. Slab Behavior in Composite Beams at Openings. II: Tests and Verification. **Journal of Structural Engineering**, v. 118, n. 9, p. 2304–2322, 1992.

CORREA DE FARIA, C.; CARVALHO, H.; HALLAL FAKURY, R.; FIGUEIREDO GRILO, L. Lateral-torsional buckling resistance of cellular steel beams at room temperature and fire situation. **Engineering Structures**, v. 237, n. February, p. 112046, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112046>>.

CORREA DE FARIA, C.; CARVALHO, H.; HALLAL FAKURY, R.; FIGUEIREDO GRILO, L. Lateral-torsional buckling resistance of cellular steel beams at room temperature and fire situation. **Engineering Structures**, v. 237, n. January, p. 112046, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112046>>.

DAI, X.; YANG, J.; ZHOU, K.; SHEEHAN, T.; LAM, D. Numerical study of steel–concrete composite cellular beam using demountable shear connectors. **Structures**, v. 51, n. February, p. 1328–1340, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.134>>.

DAS, P. K.; SRIMANI, S. L. **Handbook for the design of castellated beams**. New Delhi, Delhi, India: Company, Oxford & IBH Publishing, 1984.

DASSAULT SYSTÈMES. **ABAQUS, Version 2023, Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp**2023.

DE OLIVEIRA, V. M.; DE CARVALHO, A. S.; ROSSI, A.; FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H. Elastic and inelastic analyses of composite cellular beams in hogging moment regions. **Thin-Walled Structures**, v. 184, n. December 2022, p. 110513, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110513>>.

DE OLIVEIRA, V. M.; DE CARVALHO, A. S.; ROSSI, A.; HOSSEINPOUR, M.; SHARIFI, Y.; MARTINS, C. H. Data-driven design approach for the lateral-distortional buckling in steel-concrete composite cellular beams using machine learning models. **Structures**, v. 61, n. January, p. 106018, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106018>>.

DING, J.; ZHU, J.; KANG, J.; WANG, X. Experimental study on grouped stud shear connectors in precast steel- UHPC composite bridge. **Engineering Structures**, v. 242, n. May, p. 112479, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112479>>.

DJEBLI, B.; KERDAL, D. E.; ABIDELAH, A. Additional and total deflection of composite symmetric cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 158, p. 99–106, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.015>>.

DU, H.; YUAN, S.; YU, T.; HU, X. Experimental and Analytical Investigation on Flexural Behavior of High-Strength Steel-Concrete Composite Beams. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/buildings13040902>>.

EL-DIEB, A. S.; MAHMOUD R., T.; SAMIR I., A.-E. The Use of Ceramic Waste

Powder (CWP) in Making Eco-Friendly Concretes. **Ceramic Materials: Synthesis, Characterization, Applications and Recycling**, p. 1–35, 2019.

EL-SAWY, K. M.; SWEEDAN, A. M. I.; MARTINI, M. I. Moment gradient factor of cellular steel beams under inelastic flexure. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 98, p. 20–34, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.007>>.

ELEMAM, W. E.; AGWA, I. S.; TAHWIA, A. M. Reusing Ceramic Waste as a Fine Aggregate and Supplemental Cementitious Material in the Manufacture of Sustainable Concrete. **Buildings**, v. 13, n. 11, p. 2726, 2023.

ERDAL, F.; SAKA, M. P. Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 80, p. 355–368, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.007>>.

EUROPEAN COMMISSION. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. Towards a circular economy: a zero waste programme for Europe. p. 14, 2014.

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. 2004a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings**. 2004b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-5 - Part 1-5: General rules - Plated structural elements**. Brussels: CEN – European Committee for Standardization. 2006.

FANG, H.; CHAN, T. Thin-Walled Structures Axial compressive strength of welded S460 steel columns at elevated temperatures. **Thin Walled Structures**, v. 129, n. March, p. 213–224, 2018a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.006>>.

FANG, H.; CHAN, T. Resistance of Axially Loaded Hot-finished S460 and S690 Steel Square Hollow Stub Columns at Elevated Temperatures. **Structures**, v. 17, n. August 2018, p. 66–73, 2019a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.011>>.

FANG, H.; CHAN, T. M. Axial compressive strength of welded S460 steel columns at elevated temperatures. **Thin-Walled Structures**, v. 129, n. April, p. 213–224, 2018b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.006>>.

FANG, H.; CHAN, T. M. Resistance of Axially Loaded Hot-finished S460 and S690 Steel Square Hollow Stub Columns at Elevated Temperatures. **Structures**, v. 17, n. August 2018, p. 66–73, 2019b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.011>>.

FARES, S. S.; COULSON, J.; DINEHART, D. W. Castellated and Cellular Beams Design. **American Institute of Steel Construction**, p. 1–117, 2016.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). **Model Code 2010 - First**

**complete draft, Volume 1.2010.**

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H. LRFD for Lateral-Torsional Buckling Resistance of Cellular Beams. **International Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 3, p. 303–323, 2020.

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. Advances in composite beams with web openings and composite cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 106182, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106182>>.

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. Assessment of web post buckling resistance in steel-concrete composite cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 158, n. October 2020, p. 106969, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106969>>.

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. Assessment of web post buckling resistance in steel-concrete composite cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 158, n. July 2020, p. 106969, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106969>>.

FERREIRA, F. P. V.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Lateral-torsional buckling of cellular beams according to the possible updating of EC3. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 153, p. 222–242, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.011>>.

FERREIRA, F. P. V.; TSAVDARIDIS, K. D.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. Steel-concrete-composite beams with precast hollow-core slabs: A sustainable solution. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 8, 2021a.

FERREIRA, F. P. V.; TSAVDARIDIS, K. D.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. Buckling and post-buckling analyses of composite cellular beams. **Composite Structures**, v. 262, n. December 2020, p. 113616, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113616>>.

FERREIRA FILHO, J. O.; DA SILVA, L. S.; TANKOVA, T.; CARVALHO, H. Influence of geometrical imperfections and residual stresses on the reliability of high strength steel welded I-section columns using Monte Carlo simulation. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 215, n. January, 2024.

GARSDIE, M. **Global cement production 1995-2022**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

GE, W.; LIU, C.; ZHANG, Z.; GUAN, Z.; ASHOUR, A.; SONG, S.; JIANG, H.; SUN, C.; QIU, L.; YAO, S.; YAN, W.; CAO, D. Numerical and theoretical research on flexural behaviour of steel-precast UHPC composite beams. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, n. October 2022, p. e01789, 2023a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01789>>.

GE, W.; ZHANG, Z.; ASHOUR, A.; JIANG, H.; LIU, Y.; LI, S.; CAO, D. Investigation on flexural behavior of steel-UHPC composite beams with steel shear keys. **Journal of**

**Constructional Steel Research**, v. 211, n. August, p. 108158, 2023b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108158>>.

GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**, v. 98, p. 38–48, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.016>>.

GERDAU AÇOS BRASIL. **Estruturas mistas de aço e concreto**. 56º Congresso Brasileiro do Concreto, 2014, Natal, IBRACON. Apresentação de empresa, 2014. Disponível em: <<https://www.ibracon.org.br/eventos/56cbc/novastecnologias.asp>>. Acesso em: 6 nov. 2024.

GRASSL, P.; JIRÁSEK, M. Damage-plastic model for concrete failure. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, n. 22–23, p. 7166–7196, 2006.

GRILO, L. F.; FAKURY, R. H.; CASTRO E SILVA, A. L. R. de; VERÍSSIMO, G. de S. Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 148, p. 525–541, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.020>>.

HAO, N.; YANG, Y.; XUE, Y.; XU, L.; FENG, S.; SUN, X. Shear performance of deep partially precast high-strength steel reinforced UHPC T-beam : Experimental study and a novel shear model. **Engineering Structures**, v. 323, n. PA, p. 119256, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119256>>.

HASSANEIN, M. F.; ELKAWAS, A. A.; BOCK, M.; SHAO, Y. B.; ELCHALAKANI, M. Effect of using slender flanges on EN 1993-1-5 design model of mono-symmetric S460 corrugated web bridge girders. **Structures**, v. 33, n. September 2020, p. 330–342, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.066>>.

HE, S.; XU, Y.; ZHONG, H.; MOSALLAM, A. S.; CHEN, Z. Investigation on interfacial anti-sliding behavior of high strength steel-UHPC composite beams. **Composite Structures**, v. 316, n. June 2021, p. 117036, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117036>>.

HECHLER, O.; MÜLLER, C.; SEDLACEK, G. Investigations on beams with multiple regular web openings. **Proceedings of the 5th International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete V**, p. 270–281, 2006.

HORDIJK, D. Tensile and Tensile Fatigue Behaviour of Concrete; Experiments, Modelling and Analyses. **HERON**, v. 37, n. 1, p. 79, 1992.

HOSSEINI, S. A.; HAJIKARIMI, P.; HOSSEINI, S. F.; ALIAKBARI, A.; NEJAD, F. M. Semi-circular bending setup for predicting fracture characteristics of high-strength fiber-reinforced concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 123, n. October 2022, p. 103729, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103729>>.

HOSSEINPOUR, M.; ROSSI, A.; SANDER CLEMENTE DE SOUZA, A.; SHARIFI, Y. New predictive equations for LDB strength assessment of steel–concrete composite beams. **Engineering Structures**, v. 258, n. March, p. 114121, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114121>>.

HUSSEIN, L.; AMLEH, L. Size effect of ultra-high performance fiber reinforced concrete composite beams in shear. **Structural Concrete**, v. 19, n. 1, p. 141–151, 2018.

JACK, T. A.; SZPUNAR, J. Effect of Nb-induced microstructure on pipeline steel corrosion and stress corrosion cracking performance in acidic environment. **Corrosion Science**, v. 218, n. April, p. 111196, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111196>>.

JACKIEWICZ-REK, W.; ZAŁĘGOWSKI, K.; GARBACZ, A.; BISSONNETTE, B. Properties of cement mortars modified with ceramic waste fillers. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 681–687, 2015.

JAVED, A.; SIDDIQUE, S.; PRASAD, V. R. Investigation on ceramic waste and stone dust as aggregate replacement in concrete. **International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences**, v. 3, n. 127–130, 2015.

JIA, L.; LI, Q.; JI, W.; CHEN, C.; DU, J.; GENG, K. Influence of the local buckling of web on the bearing capacity of a castellated beam/composite beam under pure bending. **Structures**, v. 63, n. February, p. 106358, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106358>>.

KABIR, M. I.; MIA, M. M.; ISLAM, K. Numerical and analytical investigations on the flexural behaviours of composite beams of inverted-T steel section and ultra-high-performance concrete (UHPC) slab. **Structures**, v. 57, n. August, p. 105087, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105087>>.

KANG, L.; HONG, S.; LIU, X. Shear behaviour and strength design of cellular beams with circular or elongated openings. **Thin-Walled Structures**, v. 160, n. November 2020, p. 107353, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107353>>.

KERDAL, D.; NETHERCOT, D. A. Failure modes for castellated beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 4, n. 4, p. 295–315, 1984.

KUMAR, S. K.; ANBARASU, M.; SONKAR, C. Behaviour and design of cold-formed high-strength steel built-up beams. **Thin-Walled Structures**, v. 202, n. February, p. 112143, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112143>>.

LACKI, P.; NAWROT, J.; DERLATKA, A.; WINOWIECKA, J. Numerical and experimental tests of steel-concrete composite beam with the connector made of top-hat profile. **Composite Structures**, v. 211, n. November 2018, p. 244–253, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.035>>.

LANGARUDI, P. A.; EBRAHIMNEJAD, M. Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck. **Structures**, v. 26, n. May, p. 501–515, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.037>>.

LAWSON, R. M.; HICKS, S. J. P355: Design of composite beams with large web openings: in accordance with Eurocodes and the UK National Annexes. **Steel Construction Institute**, 2011a.

LAWSON, R. M.; HICKS, S. J. Design of beams with large web openings (SCI P355). **The Steel Construction Institute, UK**, p. 1–117, 2011b.

LAWSON, R. M.; LIM, J.; HICKS, S. J.; SIMMS, W. I. Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 6, p. 614–629, 2006.

LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. **JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS**, v. 124, p. 892–900, 1998. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)>](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)>).

LI, V. C.; LEUNG, C. K. Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites. **Journal of Engineering Mechanics**, p. 2246–2264, 1992.

LÓPEZ, V.; LLAMAS, B.; JUAN, A.; MORÁN, J. M.; GUERRA, I. Eco-efficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 4, p. 559–564, 2007.

LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS. **Números do Setor Cerâmico2023**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor> (accessed June 13, 2024)>.

LUBLINER, J.; OLIVER, J.; OLLER, S.; OÑATE, E. A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

MAHMUD, G. H.; YANG, Z.; HASSAN, A. M. T. Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPC) beams. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1027–1034, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.061>>.

MAO, M.; YIN, C. L.; SHEN, S. Y.; WAN, Y. Experimental and Numerical Study on Flexural Behaviors of Steel-UHPC Composite Beams under Hogging Moment. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 28, n. 6, p. 2344–2354, 2024.

MEDINA, C.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; THOMAS, C.; POLANCO, J. A.; FRÍAS, M. Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 480–486, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.176>>.

MEYER, B. et al. Macroeconomic modelling of sustainable development and the links between the economy and the environment. **Final Report of the MacMod project (ENV. F. 1/ETU/2010/0033) to the European Commission**, 2011.

MOBASHER, B. **Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites**. Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement CompositesCRC press, 2011.

MÜLLER, C.; HECHLER, O.; BUREAU, A.; BITAR, D.; JOYEUX, D.; CAJOT, L. G.; DEMARCO, T.; LAWSON, R. M.; HICKS, S.; DEVINE, P.; LAGERQVIST, E.; HEDMAN-PÉTURSSON, E.; UNOSSON, E.; FELDMANN, M. **Large web openings for service integration in composite floors**. Luxembourg: European Communities, 2006. v. 30491–120 p.

NADJAI, A.; VASSART, O.; ALI, F.; TALAMONA, D.; ALLAM, A.; HAWES, M. Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 42, n. 6–7, p. 489–497, 2007.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. [s.l.] Great Britain by Pitman Books, 1995.

NGUYEN, C. L.; LEE, C. K. Flexural behaviours of Engineered Cementitious Composites – High strength steel composite beams. **Engineering Structures**, v. 249, n. October, p. 113324, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113324>>.

OLIVEIRA, M. P. de. **Influência da adição de nióbio sobre as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão de aços inoxidáveis supermartensíticos**. 2015. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), 2015.

OLIVEIRA, V. M. de; ROSSI, A.; FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H. Stability behavior of steel–concrete composite cellular beams subjected to hogging moment. **Thin-Walled Structures**, v. 173, n. November 2021, p. 108987, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.108987>>.

PADILHA, A. F. **Influência do niobio na microestrutura e nas propriedades da austenita inoxidável Fe-Cr-Ni**. 1989. 134p. Tese (doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo., 1989.

PALII, O.; SIRICO, A.; BELLETTI, B.; BERNARDI, P. Building a Sustainable Future: Database of Concrete with Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste. **Procedia Structural Integrity**, v. 59, p. 167–174, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.025>>.

PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 76, p. 92–104, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.11.007>>.

PARK, J. W.; KIM, C. H.; YANG, S. C. Ultimate Strength of Ribbed Slab Composite Beams with Web Openings. **Journal of Structural Engineering**, v. 129, n. 6, p. 810–817, 2003.

PATHIRANA, S. W.; UY, B.; MIRZA, O.; ZHU, X. Flexural behaviour of composite steel-concrete beams utilising blind bolt shear connectors. **Engineering Structures**, v. 114, p. 181–194, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.057>>.

PRATES, L. M. S.; MARTINS, C. H.; RIBEIRO, I. E. da S.; TORRES, C. A. B.; FERREIRA, F. P. V.; KRAHL, P. A. Experimental Evaluation of High-Performance Recycled Concrete Incorporating Ceramic Sanitary Waste. **fib ICCS – International Conference on Concrete Sustainability**, 2024. Disponível em: <<https://www.fib-international.org/events/fib-events/122-iccs2024.html>>.

QIANG, X.; BIJLAARD, F. S. K.; KOLSTEIN, H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690. **Engineering Structures**, v. 35, p. 1–10, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.005>>.

QUEIROZ, F. D.; VELLASCO, P. C. G. S.; NETHERCOT, D. A. Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 63, n. 4, p. 505–521, 2007.

RAFTOYIANNIS, I. G.; IOANNIDIS, G. I. Deflection of Castellated I-Beams under Transverse Loading. **International Journal of STEEL STRUCTURES**, v. 6, n. 3, p. 31–36, 2006.

REDWOOD, B. R.; DEMIRDJIAN, S. CASTELLATED BEAM WEB BUCKLING IN SHEAR. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, p. 1202–1207, 1998.

RERKSAMOSORN, W.; RERKSAMOSORN, W.; KONGRAKAM, S.; AOSAI, P.; INMONTIEN, N.; KASOR, A.; IMJAI, T. Serviceability performance of composite metal deck with slab from recycled concrete composition. **Engineering Journal of Research and Development**, v. 33, n. 4, p. 29–46, 2022.

ROBALO, K.; COSTA, H.; DO CARMO, R.; JÚLIO, E. Experimental development of low cement content and recycled construction and demolition waste aggregates concrete. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121680, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121680>>.

ROSSI, A.; DE SOUZA, A. S. C.; NICOLETTI, R. S.; MARTINS, C. H. The influence of structural and geometric imperfections on the LDB strength of steel–concrete composite beams. **Thin-Walled Structures**, v. 162, n. February, p. 107542, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107542>>.

ROSSI, A.; DE SOUZA, A. S. C.; NICOLETTI, R. S.; MARTINS, C. H. The influence of structural and geometric imperfections on the LDB strength of steel–concrete composite beams. **Thin-Walled Structures**, v. 162, n. January, p. 107542, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107542>>.

ROSSI, A.; FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; MESACASA JÚNIOR, E. C. Assessment of lateral distortional buckling resistance in welded I-beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 166, 2020a.

ROSSI, A.; MARTINS, C. H.; NICOLETTI, R. S.; DE SOUZA, A. S. C. Reassessment of lateral torsional buckling in hot-hollowed I-beams. **Structures**, v. 26, n. May, p. 524–536, 2020b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.041>>.

ROSSI, A.; NICOLETTI, R. S.; DE SOUZA, A. S. C.; MARTINS, C. H. Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, p. 106192, 2020c. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106192>>.

ROSSI, A.; SOUZA, A. S. C. de; NICOLETTI, R. S.; MARTINS, C. H. Stability behavior of Steel–concrete Composite Beams subjected to hogging moment. **Thin-Walled Structures**, v. 167, n. April, p. 108193, 2021c. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108193>>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Brasil lidera produção global de nióbio e se destaca como principal detentor das reservas**. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/w/brasil-lidera-producao-global-de-niobio-e-se-destaca-como->

principal-detentor-das-reservas>. Acesso em: 4 dez. 2024.

SHAMASS, R.; CASHELL, K. A. Behaviour of Composite Beams Made Using High Strength Steel. **Structures**, v. 12, n. May, p. 88–101, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2017.08.005>>.

SHAO, X.; DENG, L.; CAO, J. Innovative steel-UHPC composite bridge girders for long-span bridges. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 13, n. 4, p. 981–989, 2019.

SHARAKY, I. A.; SELEEM, M. H.; ELAMARY, A. S. Minimizing the crumb rubber effects on the flexural behaviour of the layered RC beams cast using rubberized concrete with or without recycled tire steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 400, n. July, p. 132503, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132503>>.

SHEEHAN, T.; DAI, X.; LAM, D.; AGGELOPOULOS, E.; LAWSON, M.; OBIALA, R. Experimental study on long spanning composite cellular beam under flexure and shear. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 116, p. 40–54, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.047>>.

SOLDATTI, H. B. **Influência da Adição do Nióbio no Comportamento Mecânico e Microestrutural do Aço SAE 6150**. 2015. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SONCK, D.; BELIS, J. Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 3, p. 1–9, 2017.

SONCK, D.; BOISSONNADE, N.; VAN IMPE, R. Instabilities of cellular members loaded in bending or compression. **Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2012**, p. 509–526, 2012.

SONG, S. S.; XU, F.; CHEN, J.; QIN, F.; HUANG, Y.; YAN, X. Feasibility and performance of novel tapered iron bolt shear connectors in demountable composite beams. **Journal of Building Engineering**, v. 53, n. March, p. 104528, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104528>>.

SU, A.; SUN, Y.; LIANG, Y.; ZHAO, O. Membrane residual stresses and local buckling of S960 ultra-high strength steel welded I-section stub columns. **Thin-Walled Structures**, v. 161, n. January, p. 107497, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107497>>.

TONG, L.; CHEN, L.; WANG, X.; ZHU, J.; SHAO, X.; ZHAO, Z. Experiment and finite element analysis of bending behavior of high strength steel-UHPC composite beams. **Engineering Structures**, v. 266, n. February, p. 114594, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114594>>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME INTERNATIONAL RESOURCE PANEL. **Global Resources Outlook 2024 - Bend the trend: Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes**2024. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>>.

VASSART, O. **Analytical model for cellular beams made of hot rolled sections in case of fire.** *Civil Engineering. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II*. NNT : 2009CLF21951. 2009. 2009. Disponível em: <<https://theses.hal.science/tel-00860914>>.

VIGNERI, V.; ODENBREIT, C.; ROMERO, A. Numerical study on design rules for minimum degree of shear connection in propped steel–concrete composite beams. **Engineering Structures**, v. 241, n. May, p. 112466, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112466>>.

WANG, P.; GUO, K.; LIU, M.; ZHANG, L. 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.02.012>>.

WANG, W.; ZHANG, X.; ZHOU, X.; ZHANG, B.; CHEN, J. Case Studies in Construction Materials Experimental study on shear performance of an advanced bolted connection in steel-concrete composite beams. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, n. March, p. e01037, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01037>>.

WANG, Y. H.; YU, J.; LIU, J. P.; ZHOU, B. X.; CHEN, Y. F. Experimental study on assembled monolithic steel-prestressed concrete composite beam in negative moment. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 167, p. 105667, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.06.004>>.

WARD, J. K. **Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams.** Silwood Park, Ascot, UK: Steel Construction Institute: Steel Construction Institute, 1990.

WIJESIRI PATHIRANA, S.; UY, B.; MIRZA, O.; ZHU, X. Flexural behaviour of composite steel-concrete beams utilising blind bolt shear connectors. **Engineering Structures**, v. 114, p. 181–194, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.057>>.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Total Production of crude steel.** Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

YANG, T.; XIE, R. Fatigue Behaviors of Joints between Steel Girders with Corrugated Webs and Top RC Slabs under Transverse Bending Moments. **Materials**, 2023.

YUN, X.; GARDNER, L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 133, p. 36–46, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>>.

ZHANG, C.; HUI, W.; ZHAO, X.; ZHANG, Y.; ZHAO, X. The potential significance of microalloying with Nb in enhancing the resistance to hydrogen-induced delayed fracture of 1300-MPa-grade high-strength bolt steel.pdf. **Engineering Failure Analysis**, 2022.

ZHANG, J.; SU, A.; JIANG, K. Post-fire behavior and residual resistances of S890 ultra-high strength steel circular hollow sections under combined compression and bending. **Engineering Structures**, v. 316, n. July, p. 118519, 2024. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118519>>.

ZHAO, H.; YUAN, Y. Experimental studies on composite beams with high-strength steel and concrete. **Steel and Composite Structures**, v. 10, n. 5, p. 373–383, 2010.

ZHONG, Z.; TAO, P.; JIN, H.; LOU, R.; CUI, Y.; LIU, J. A quantitative investigation on the fragmentation performance of SCDA in cracking steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 403, n. February, p. 133133, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133133>>.

ZHU, J.; DING, J.; WANG, Y. Numerical and theoretical studies on shear behavior of steel-UHPC composite beams with waffle slab. **Journal of Building Engineering**, v. 47, n. December 2021, p. 103913, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103913>>.

ZHU, J. S.; WANG, Y. G.; YAN, J. B.; GUO, X. Y. Shear behaviour of steel-UHPC composite beams in waffle bridge deck. **Composite Structures**, v. 234, n. July 2019, p. 111678, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111678>>.

ZONG, Y.; LIU, C. M. Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of ultra-low carbon bainite steel with different niobium content. **Materials**, v. 14, n. 2, p. 1–16, 2021.

# **APÊNDICES**

**APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)**

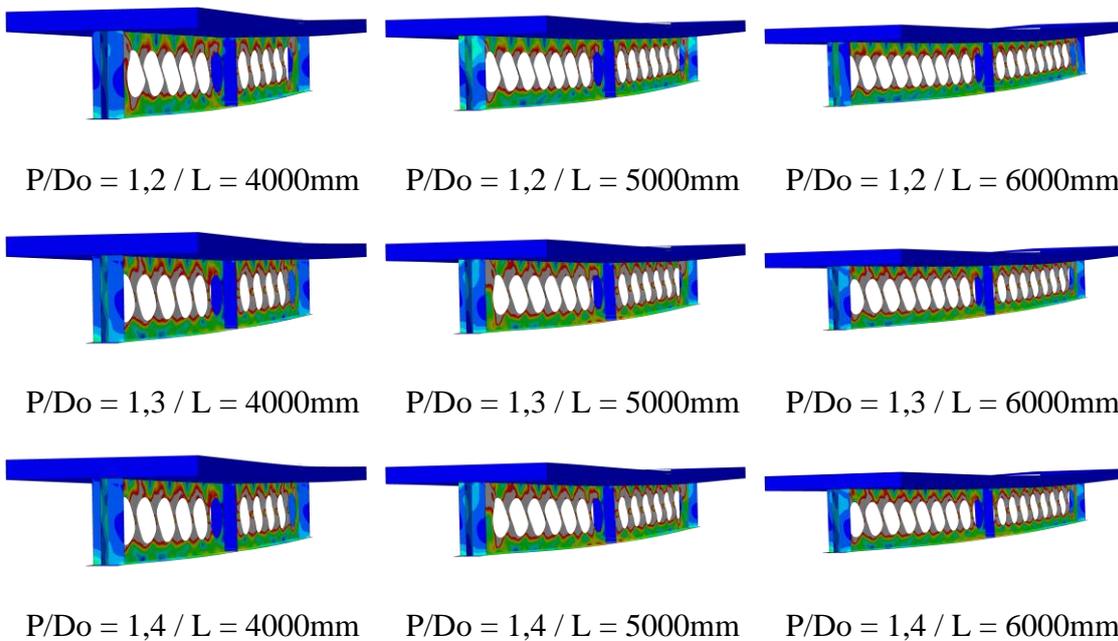
Estão apresentados abaixo os valores de carga crítica e os modos de falhas de cada modelo analisado na Paramétrica I

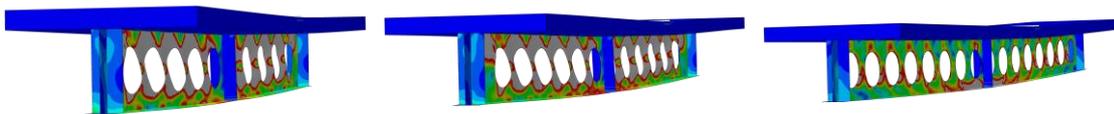
**Apêndice A.1:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 0,8$

P/D <sub>o</sub>	L [mm]	D <sub>o</sub> [mm]	P [mm]	d <sub>g</sub> [mm]	b <sub>w</sub> [mm]	d <sub>g</sub> /D <sub>o</sub>	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	248,00	297,60	431,49	49,60	1,74	268,54	FMA
	5000,00	248,00	297,60	431,49	49,60	1,74	233,61	FMA
	6000,00	248,00	297,60	431,49	49,60	1,74	203,99	FMA
1,3	4000,00	248,00	322,40	428,29	74,40	1,73	292,80	FMA
	5000,00	248,00	322,40	428,29	74,40	1,73	299,66	FMA
	6000,00	248,00	322,40	428,29	74,40	1,73	270,59	FMA
1,4	4000,00	248,00	347,20	423,65	99,20	1,71	365,65	FMA
	5000,00	248,00	347,20	423,65	99,20	1,71	330,40	FMA
	6000,00	248,00	347,20	423,65	99,20	1,71	329,17	FMA
1,5	4000,00	248,00	372,00	417,39	124,00	1,68	390,17	FMA
	5000,00	248,00	372,00	417,39	124,00	1,68	387,86	FMA
	6000,00	248,00	372,00	417,39	124,00	1,68	347,33	MV

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.2:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS





$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$

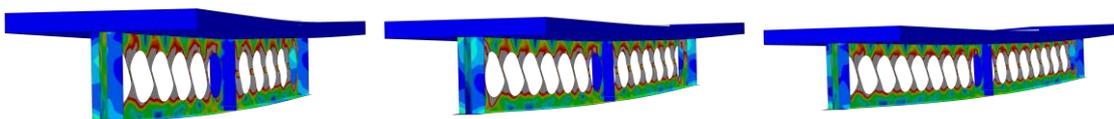
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.3:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	279,00	334,80	446,68	55,80	1,60	237,20	FMA
	5000,00	279,00	334,80	446,68	55,80	1,60	225,96	FMA
	6000,00	279,00	334,80	446,68	55,80	1,60	191,34	FMA
1,3	4000,00	279,00	362,70	443,07	83,70	1,59	294,65	FMA
	5000,00	279,00	362,70	443,07	83,70	1,59	291,49	FMA
	6000,00	279,00	362,70	443,07	83,70	1,59	255,32	FMA
1,4	4000,00	279,00	390,60	437,85	111,60	1,57	319,59	FMA
	5000,00	279,00	390,60	437,85	111,60	1,57	321,63	FMA
	6000,00	279,00	390,60	437,85	111,60	1,57	315,04	FMA
1,5	4000,00	279,00	418,50	430,81	139,50	1,54	388,02	MV+FMA
	5000,00	279,00	418,50	430,81	139,50	1,54	344,26	MV+FMA
	6000,00	279,00	418,50	430,81	139,50	1,54	343,38	MV+FMA

Fonte: Autor (2025)

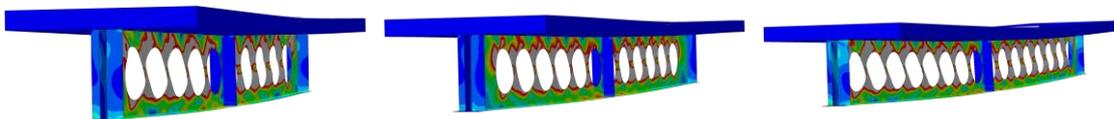
**Apêndice A.4:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS



$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$

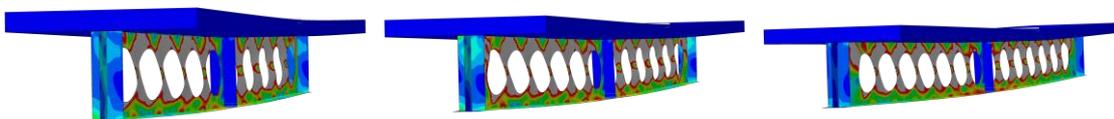
$P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$

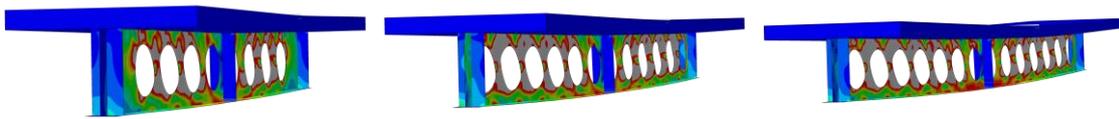
$P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$

$P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



P/Do = 1,5 / L = 4000mm    P/Do = 1,5 / L = 5000mm    P/Do = 1,5 / L = 6000mm

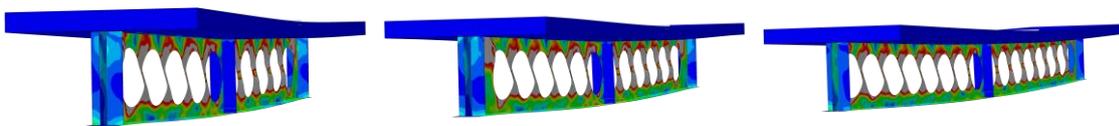
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.5:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,0$

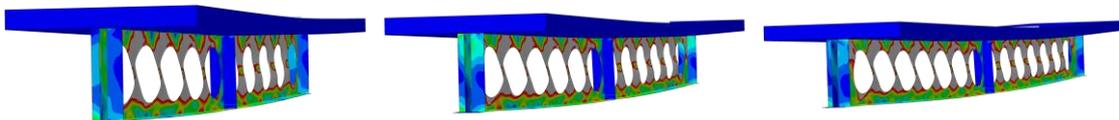
P/D <sub>o</sub>	L [mm]	D <sub>o</sub> [mm]	P [mm]	d <sub>g</sub> [mm]	b <sub>w</sub> [mm]	d <sub>g</sub> /D <sub>o</sub>	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	310,00	372,00	461,87	62,00	1,49	233,08	FMA
	5000,00	310,00	372,00	461,87	62,00	1,49	227,55	FMA
	6000,00	310,00	372,00	461,87	62,00	1,49	183,71	FMA
1,3	4000,00	310,00	403,00	457,86	93,00	1,48	256,16	FMA
	5000,00	310,00	403,00	457,86	93,00	1,48	254,50	FMA
	6000,00	310,00	403,00	457,86	93,00	1,48	248,04	FMA
1,4	4000,00	310,00	434,00	452,06	124,00	1,46	333,77	FMA
	5000,00	310,00	434,00	452,06	124,00	1,46	321,35	FMA
	6000,00	310,00	434,00	452,06	124,00	1,46	281,32	FMA
1,5	4000,00	310,00	465,00	444,23	155,00	1,43	352,17	FMA
	5000,00	310,00	465,00	444,23	155,00	1,43	345,27	FMA
	6000,00	310,00	465,00	444,23	155,00	1,43	331,82	MV+FMA

Fonte: Autor (2025)

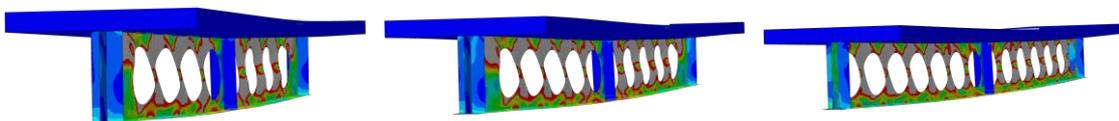
**Apêndice A.6:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS



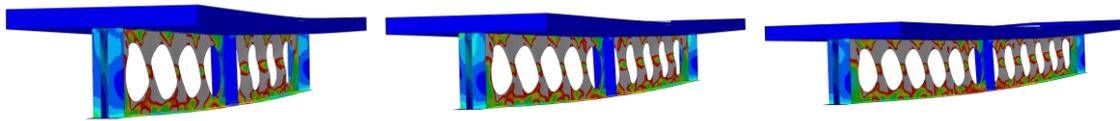
P/Do = 1,2 / L = 4000mm    P/Do = 1,2 / L = 5000mm    P/Do = 1,2 / L = 6000mm



P/Do = 1,3 / L = 4000mm    P/Do = 1,3 / L = 5000mm    P/Do = 1,3 / L = 6000mm



P/Do = 1,4 / L = 4000mm    P/Do = 1,4 / L = 5000mm    P/Do = 1,4 / L = 6000mm



$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$

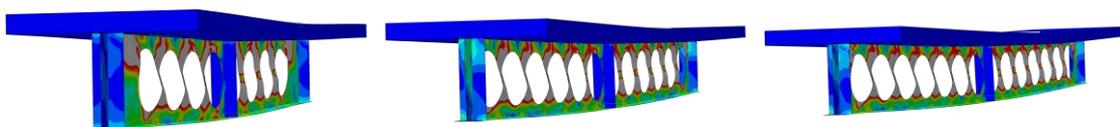
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.7:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	341,00	409,20	477,06	68,20	1,40	262,89	FMA
	5000,00	341,00	409,20	477,06	68,20	1,40	191,58	FMA
	6000,00	341,00	409,20	477,06	68,20	1,40	182,83	FMA
1,3	4000,00	341,00	443,30	472,65	102,30	1,39	277,03	FMA
	5000,00	341,00	443,30	472,65	102,30	1,39	264,18	FMA
	6000,00	341,00	443,30	472,65	102,30	1,39	249,64	FMA
1,4	4000,00	341,00	477,40	466,27	136,40	1,37	296,35	FMA
	5000,00	341,00	477,40	466,27	136,40	1,37	290,59	FMA
	6000,00	341,00	477,40	466,27	136,40	1,37	278,81	FMA
1,5	4000,00	341,00	511,50	457,66	170,50	1,34	319,79	FMA
	5000,00	341,00	511,50	457,66	170,50	1,34	308,97	FMA
	6000,00	341,00	511,50	457,66	170,50	1,34	304,59	MV+FMA

Fonte: Autor (2025)

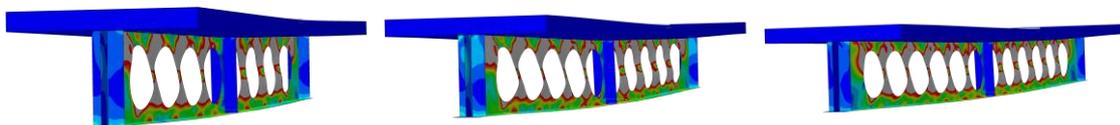
**Apêndice A.8:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS



$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$

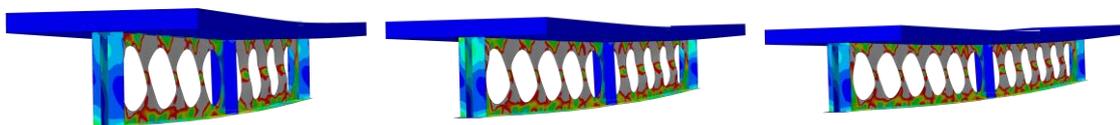
$P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$

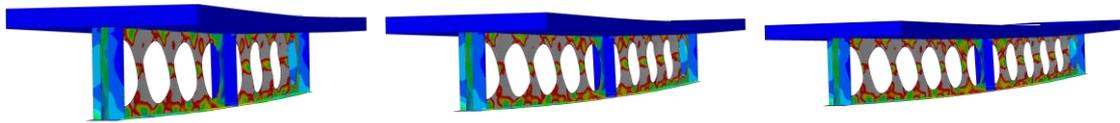
$P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$

$P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$

$P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$

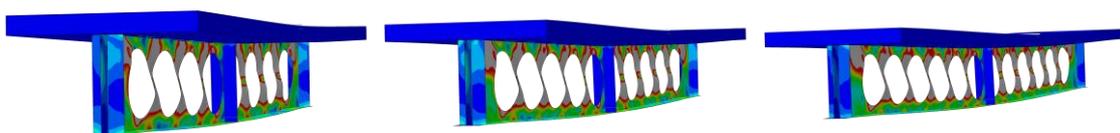
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.9:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,2$

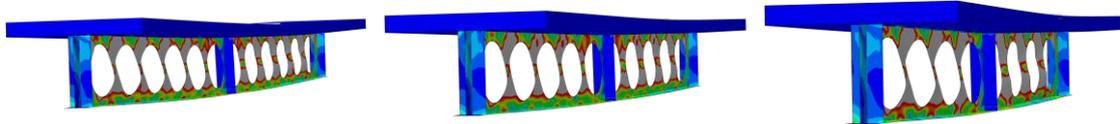
$P/D_o$	$L$ [mm]	$D_o$ [mm]	$P$ [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	372,00	446,40	492,24	74,40	1,32	223,93	FMA
	5000,00	372,00	446,40	492,24	74,40	1,32	210,10	FMA
	6000,00	372,00	446,40	492,24	74,40	1,32	192,65	FMA
1,3	4000,00	372,00	483,60	487,43	111,60	1,31	243,34	FMA
	5000,00	372,00	483,60	487,43	111,60	1,31	236,04	FMA
	6000,00	372,00	483,60	487,43	111,60	1,31	221,87	FMA
1,4	4000,00	372,00	520,80	480,47	148,80	1,29	338,18	FMA
	5000,00	372,00	520,80	480,47	148,80	1,29	309,50	FMA
	6000,00	372,00	520,80	480,47	148,80	1,29	284,48	FMA
1,5	4000,00	372,00	558,00	471,08	186,00	1,27	356,60	FMA
	5000,00	372,00	558,00	471,08	186,00	1,27	329,69	FMA
	6000,00	372,00	558,00	471,08	186,00	1,27	306,40	MV+FMA

Fonte: Autor (2025)

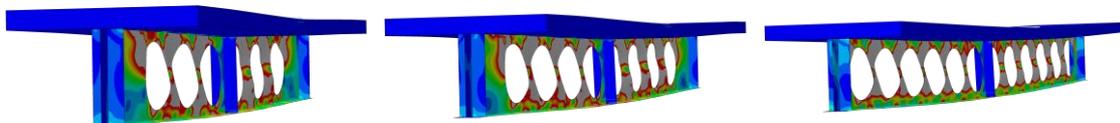
**Apêndice A.10:** Seção W310x38,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS



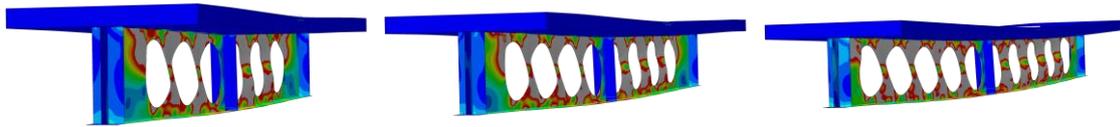
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$

Fonte: Autor (2025)

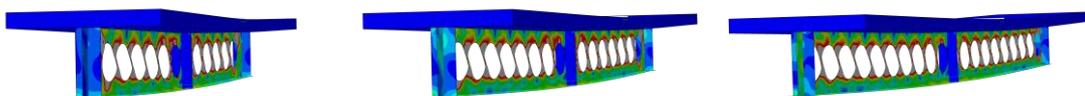
**Apêndice A.11:** Seção W310x44,5  $D_o/d = 0,8$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	250,40	300,50	435,67	50,10	1,74	326,67	FMA
	5000,00	250,40	300,50	435,67	50,10	1,74	285,56	FMA
	6000,00	250,40	300,50	435,67	50,10	1,74	250,37	FMA
1,3	4000,00	250,40	325,50	432,44	75,10	1,73	355,08	FMA
	5000,00	250,40	325,50	432,44	75,10	1,73	366,30	FMA
	6000,00	250,40	325,50	432,44	75,10	1,73	334,63	FMA
1,4	4000,00	250,40	350,60	427,74	100,20	1,71	434,66	FMA
	5000,00	250,40	350,60	427,74	100,20	1,71	408,69	FMA
	6000,00	250,40	350,60	427,74	100,20	1,71	404,98	MV
1,5	4000,00	250,40	375,60	421,43	125,20	1,68	463,76	FMA
	5000,00	250,40	375,60	421,43	125,20	1,68	454,38	MV
	6000,00	250,40	375,60	421,43	125,20	1,68	393,95	MV

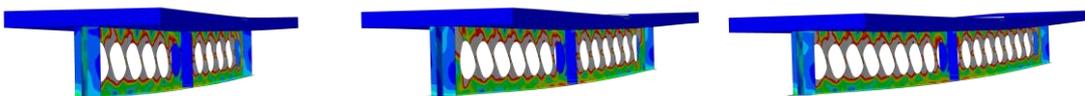
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.12:** Seção W310x44,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS

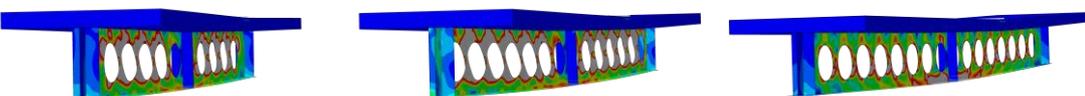
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

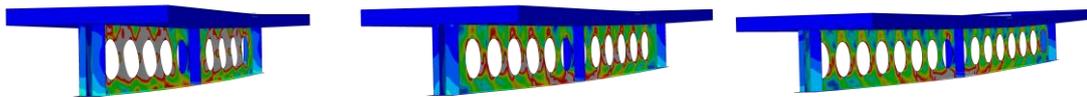


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

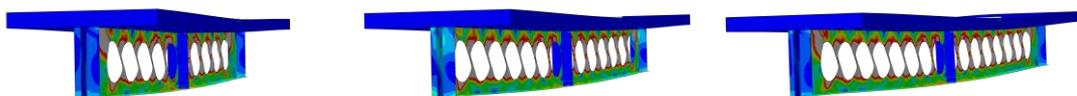
**Apêndice A.13:** Seção W310x44,5  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	281,70	338,00	451,01	56,30	1,60	333,12	FMA
	5000,00	281,70	338,00	451,01	56,30	1,60	274,42	FMA
	6000,00	281,70	338,00	451,01	56,30	1,60	266,77	FMA
1,3	4000,00	281,70	366,20	447,36	84,50	1,59	356,97	FMA
	5000,00	281,70	366,20	447,36	84,50	1,59	358,54	FMA
	6000,00	281,70	366,20	447,36	84,50	1,59	320,43	FMA
1,4	4000,00	281,70	394,40	442,09	112,70	1,57	393,40	FMA
	5000,00	281,70	394,40	442,09	112,70	1,57	399,00	FMA
	6000,00	281,70	394,40	442,09	112,70	1,57	397,40	FMA
1,5	4000,00	281,70	422,50	434,99	140,80	1,54	463,42	MV+FMA
	5000,00	281,70	422,50	434,99	140,80	1,54	430,09	MV+FMA
	6000,00	281,70	422,50	434,99	140,80	1,54	396,57	MV

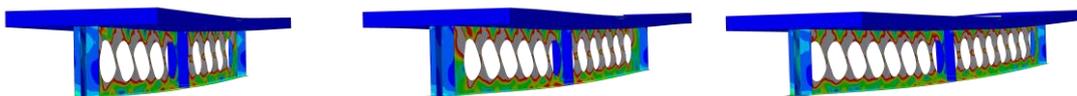
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.14:** Seção W310x44,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS

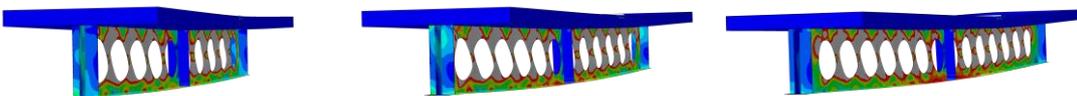
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

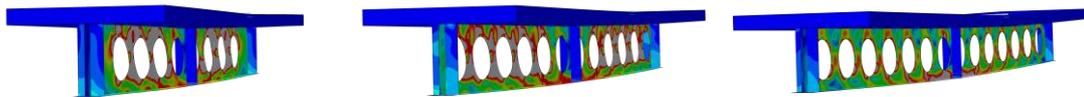


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

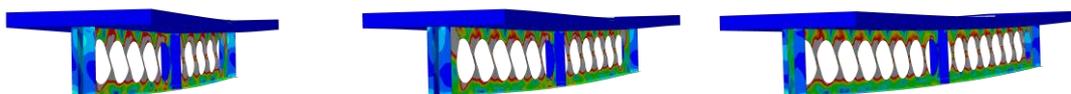
**Apêndice A.15:** Seção W310x44,5  $D_o/d = 1,0$

$P/D_o$	$L$ [mm]	$D_o$ [mm]	$P$ [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	313,00	375,60	466,34	62,60	1,49	286,27	FMA
	5000,00	313,00	375,60	466,34	62,60	1,49	283,14	FMA
	6000,00	313,00	375,60	466,34	62,60	1,49	227,72	FMA
1,3	4000,00	313,00	406,90	462,29	93,90	1,48	318,22	FMA
	5000,00	313,00	406,90	462,29	93,90	1,48	317,37	FMA
	6000,00	313,00	406,90	462,29	93,90	1,48	312,48	FMA
1,4	4000,00	313,00	438,20	456,43	125,20	1,46	419,24	FMA
	5000,00	313,00	438,20	456,43	125,20	1,46	404,90	FMA
	6000,00	313,00	438,20	456,43	125,20	1,46	388,73	FMA
1,5	4000,00	313,00	469,50	448,53	156,50	1,43	442,89	FMA
	5000,00	313,00	469,50	448,53	156,50	1,43	436,69	FMA
	6000,00	313,00	469,50	448,53	156,50	1,43	395,39	MV

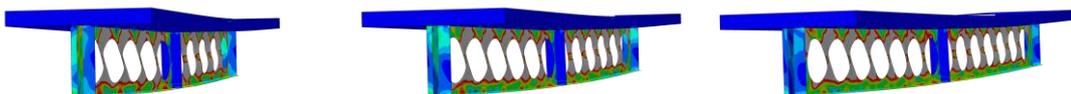
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.16:** Seção W310x44,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS

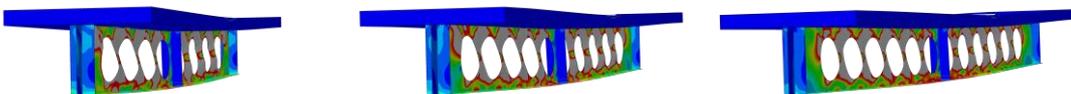
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

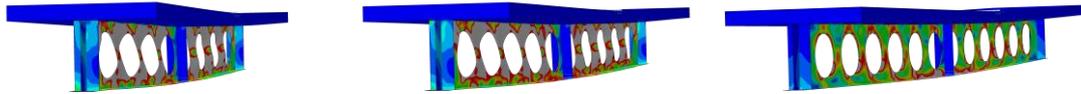


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

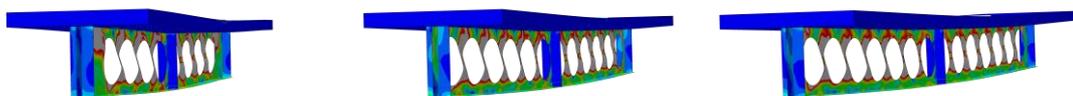
**Apêndice A.17:** Seção W310x44,5  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	344,30	413,20	481,67	68,90	1,40	325,05	FMA
	5000,00	344,30	413,20	481,67	68,90	1,40	234,09	FMA
	6000,00	344,30	413,20	481,67	68,90	1,40	227,68	FMA
1,3	4000,00	344,30	447,60	477,22	103,30	1,39	347,68	FMA
	5000,00	344,30	447,60	477,22	103,30	1,39	333,78	FMA
	6000,00	344,30	447,60	477,22	103,30	1,39	314,74	FMA
1,4	4000,00	344,30	482,00	470,78	137,70	1,37	374,48	FMA
	5000,00	344,30	482,00	470,78	137,70	1,37	371,81	FMA
	6000,00	344,30	482,00	470,78	137,70	1,37	356,92	FMA
1,5	4000,00	344,30	516,50	462,07	172,20	1,34	409,72	FMA
	5000,00	344,30	516,50	462,07	172,20	1,34	451,00	FMA
	6000,00	344,30	516,50	462,07	172,20	1,34	404,29	MV

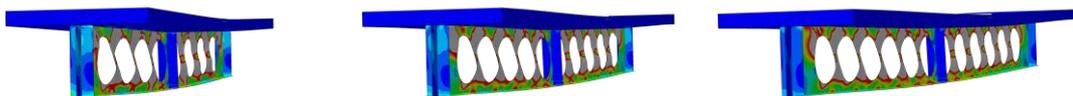
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.18:** Seção W310x44,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS

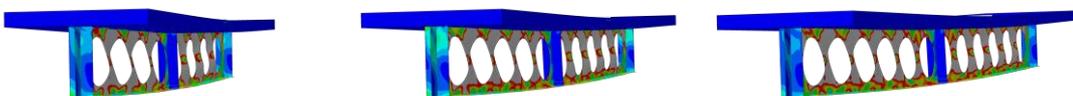
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

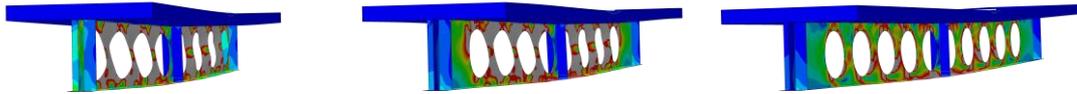


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

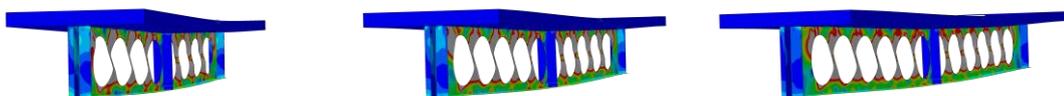
**Apêndice A.19:** Seção W310x44,5  $D_o/d = 1,2$

$P/D_o$	$L$ [mm]	$D_o$ [mm]	$P$ [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	375,60	450,70	497,01	75,10	1,32	279,63	FMA
	5000,00	375,60	450,70	497,01	75,10	1,32	261,91	FMA
	6000,00	375,60	450,70	497,01	75,10	1,32	239,69	FMA
1,3	4000,00	375,60	488,30	492,15	112,70	1,31	304,25	FMA
	5000,00	375,60	488,30	492,15	112,70	1,31	298,49	FMA
	6000,00	375,60	488,30	492,15	112,70	1,31	282,81	FMA
1,4	4000,00	375,60	525,80	485,13	150,20	1,29	430,70	FMA
	5000,00	375,60	525,80	485,13	150,20	1,29	395,81	FMA
	6000,00	375,60	525,80	485,13	150,20	1,29	364,14	FMA
1,5	4000,00	375,60	563,40	475,64	187,80	1,27	452,10	FMA
	5000,00	375,60	563,40	475,64	187,80	1,27	423,16	FMA
	6000,00	375,60	563,40	475,64	187,80	1,27	386,94	MV+FMA

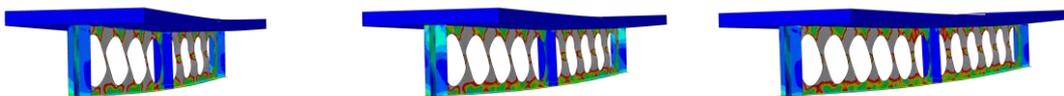
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.20:** Seção W310x44,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS

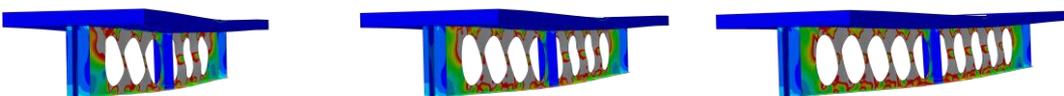
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

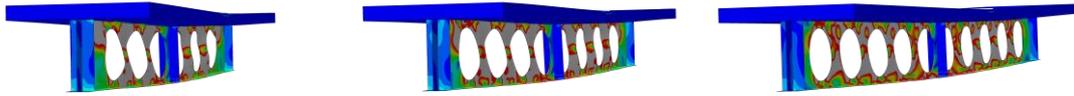


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

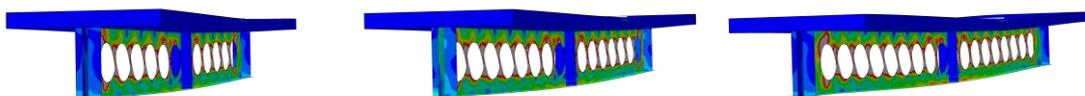
**Apêndice A.21:** Seção W310x52,0  $D_o/d = 0,8$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	253,60	304,30	441,24	50,70	1,74	393,20	FMA
	5000,00	253,60	304,30	441,24	50,70	1,74	353,60	FMA
	6000,00	253,60	304,30	441,24	50,70	1,74	348,28	FMA
1,3	4000,00	253,60	329,70	437,96	76,10	1,73	428,77	FMA
	5000,00	253,60	329,70	437,96	76,10	1,73	442,49	MV+FMA
	6000,00	253,60	329,70	437,96	76,10	1,73	410,55	FMA
1,4	4000,00	253,60	355,00	433,22	101,40	1,71	559,19	FMA
	5000,00	253,60	355,00	433,22	101,40	1,71	513,21	FMA
	6000,00	253,60	355,00	433,22	101,40	1,71	468,30	MV
1,5	4000,00	253,60	380,40	426,81	126,80	1,68	594,25	MV+FMA
	5000,00	253,60	380,40	426,81	126,80	1,68	555,77	MV+FMA
	6000,00	253,60	380,40	426,81	126,80	1,68	461,10	MV

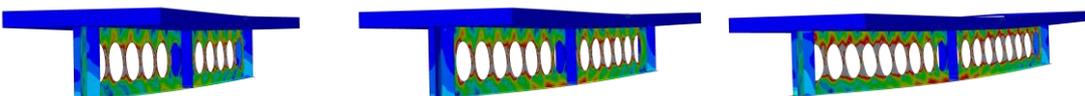
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.22:** Seção W310x52,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS

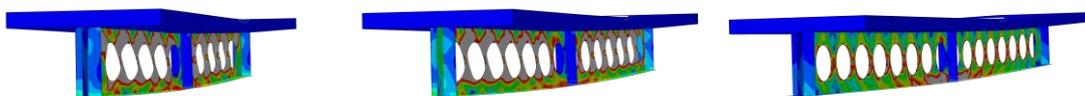
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

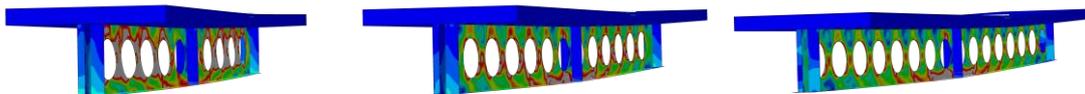


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

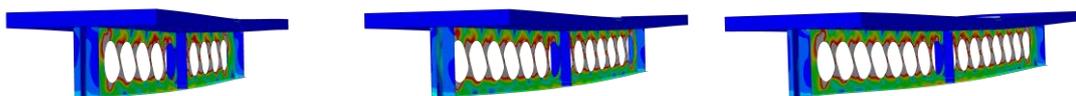
**Apêndice A.23:** Seção W310x52,0  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	285,30	342,40	456,76	57,10	1,60	395,54	FMA
	5000,00	285,30	342,40	456,76	57,10	1,60	337,00	FMA
	6000,00	285,30	342,40	456,76	57,10	1,60	327,98	FMA
1,3	4000,00	285,30	370,90	453,08	85,60	1,59	435,99	FMA
	5000,00	285,30	370,90	453,08	85,60	1,59	437,81	FMA
	6000,00	285,30	370,90	453,08	85,60	1,59	400,78	FMA
1,4	4000,00	285,30	399,40	447,75	114,10	1,57	504,30	FMA
	5000,00	285,30	399,40	447,75	114,10	1,57	509,92	FMA
	6000,00	285,30	399,40	447,75	114,10	1,57	464,72	MV
1,5	4000,00	285,30	428,00	440,52	142,70	1,54	601,73	FMA
	5000,00	285,30	428,00	440,52	142,70	1,54	553,52	MV
	6000,00	285,30	428,00	440,52	142,70	1,54	467,89	MV

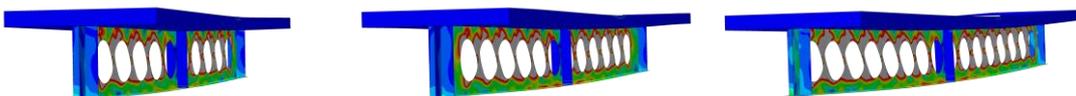
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.24:** Seção W310x52,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS

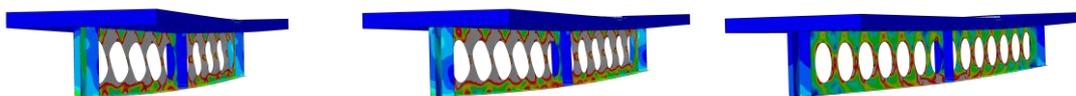
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

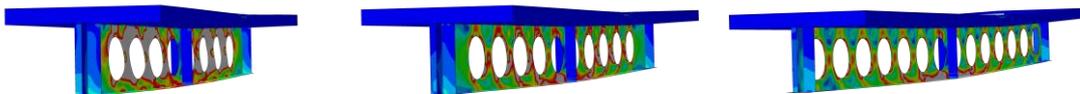


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

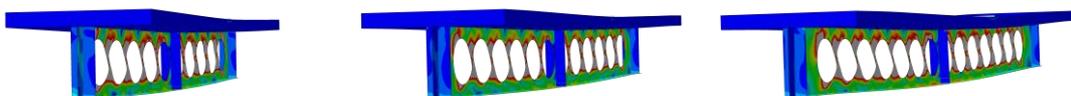
**Apêndice A.25:** Seção W310x52,0  $D_o/d = 1,0$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	317,00	380,40	472,30	63,40	1,49	346,30	FMA
	5000,00	317,00	380,40	472,30	63,40	1,49	334,94	FMA
	6000,00	317,00	380,40	472,30	63,40	1,49	319,53	FMA
1,3	4000,00	317,00	412,10	468,20	95,10	1,48	481,02	FMA
	5000,00	317,00	412,10	468,20	95,10	1,48	395,22	FMA
	6000,00	317,00	412,10	468,20	95,10	1,48	394,56	FMA
1,4	4000,00	317,00	443,80	462,27	126,80	1,46	522,52	FMA
	5000,00	317,00	443,80	462,27	126,80	1,46	512,37	FMA
	6000,00	317,00	443,80	462,27	126,80	1,46	482,86	MV
1,5	4000,00	317,00	475,50	454,27	158,50	1,43	556,72	FMA
	5000,00	317,00	475,50	454,27	158,50	1,43	543,84	MV
	6000,00	317,00	475,50	454,27	158,50	1,43	478,44	MV

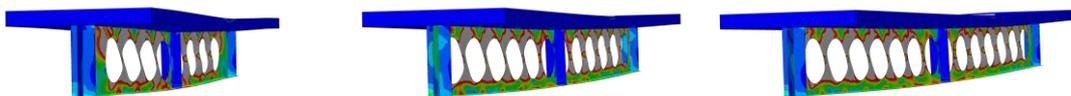
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.26:** Seção W310x52,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS

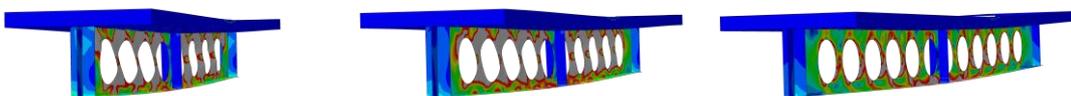
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

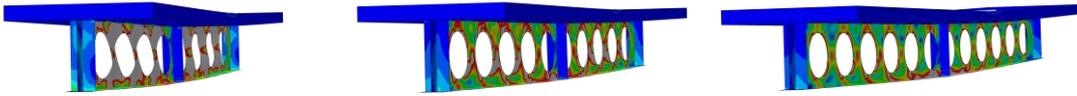


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

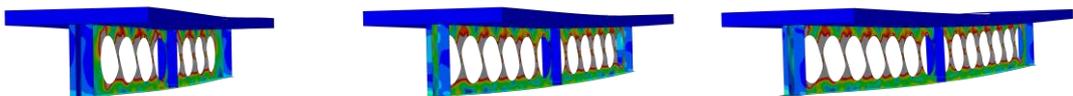
**Apêndice A.27:** Seção W310x52,0  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	348,70	418,40	487,83	69,70	1,40	373,65	FMA
	5000,00	348,70	418,40	487,83	69,70	1,40	289,67	FMA
	6000,00	348,70	418,40	487,83	69,70	1,40	283,85	FMA
1,3	4000,00	348,70	453,30	483,32	104,60	1,39	417,24	FMA
	5000,00	348,70	453,30	483,32	104,60	1,39	407,81	FMA
	6000,00	348,70	453,30	483,32	104,60	1,39	395,84	FMA
1,4	4000,00	348,70	488,20	476,79	139,50	1,37	473,38	FMA
	5000,00	348,70	488,20	476,79	139,50	1,37	475,89	FMA
	6000,00	348,70	488,20	476,79	139,50	1,37	458,17	FMA
1,5	4000,00	348,70	523,00	468,01	174,30	1,34	589,37	FMA
	5000,00	348,70	523,00	468,01	174,30	1,34	536,60	MV
	6000,00	348,70	523,00	468,01	174,30	1,34	479,78	MV

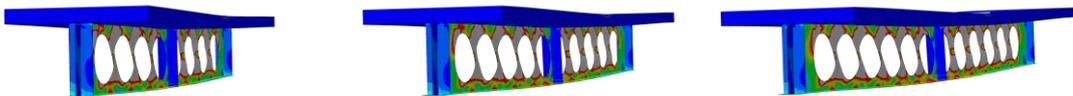
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.28:** Seção W310x52,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS

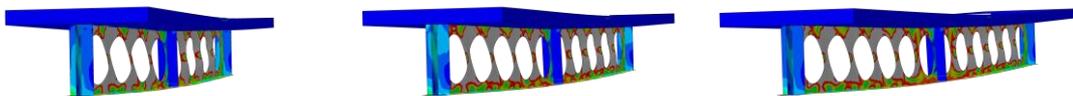
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

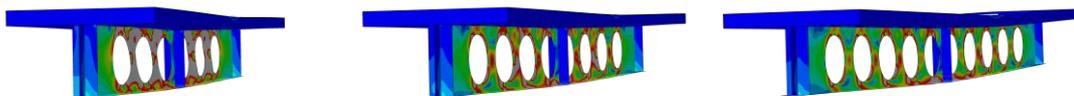


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

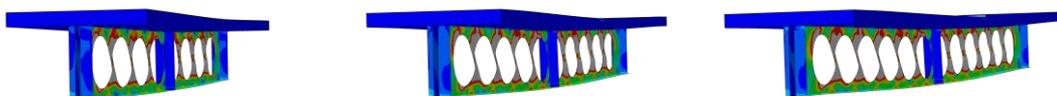
**Apêndice A.29:** Seção W310x52,0  $D_o/d = 1,2$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	380,40	456,50	503,36	76,10	1,32	329,69	FMA
	5000,00	380,40	456,50	503,36	76,10	1,32	311,80	FMA
	6000,00	380,40	456,50	503,36	76,10	1,32	298,03	FMA
1,3	4000,00	380,40	494,50	498,44	114,10	1,31	376,79	FMA
	5000,00	380,40	494,50	498,44	114,10	1,31	375,77	FMA
	6000,00	380,40	494,50	498,44	114,10	1,31	363,81	FMA
1,4	4000,00	380,40	532,60	491,31	152,20	1,29	527,39	FMA
	5000,00	380,40	532,60	491,31	152,20	1,29	494,69	FMA
	6000,00	380,40	532,60	491,31	152,20	1,29	462,44	FMA
1,5	4000,00	380,40	570,60	481,72	190,20	1,27	548,73	FMA
	5000,00	380,40	570,60	481,72	190,20	1,27	516,05	MV
	6000,00	380,40	570,60	481,72	190,20	1,27	472,83	MV

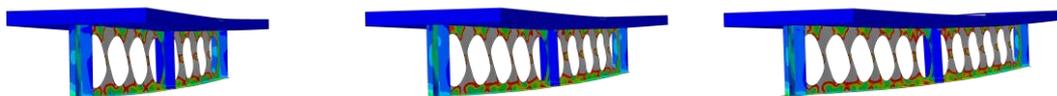
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.30:** Seção W310x52,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS

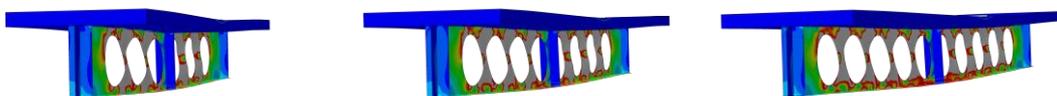
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

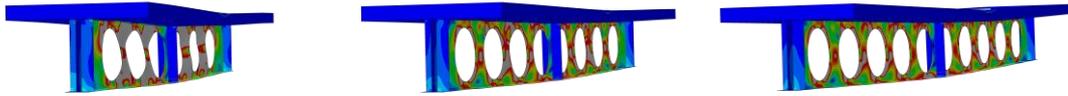


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

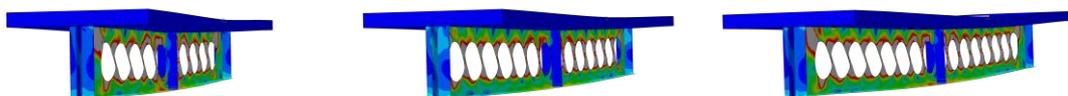
**Apêndice A.31:** Seção W360x44,0  $D_o/d = 0,8$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	281,60	337,90	489,96	56,30	1,74	378,04	FMA
	5000,00	281,60	337,90	489,96	56,30	1,74	316,37	FMA
	6000,00	281,60	337,90	489,96	56,30	1,74	304,25	FMA
1,3	4000,00	281,60	366,10	486,31	84,50	1,73	406,02	FMA
	5000,00	281,60	366,10	486,31	84,50	1,73	403,32	FMA
	6000,00	281,60	366,10	486,31	84,50	1,73	364,95	FMA
1,4	4000,00	281,60	394,20	481,05	112,60	1,71	443,87	FMA
	5000,00	281,60	394,20	481,05	112,60	1,71	447,01	FMA
	6000,00	281,60	394,20	481,05	112,60	1,71	444,25	MV
1,5	4000,00	281,60	422,40	473,94	140,80	1,68	549,75	FMA
	5000,00	281,60	422,40	473,94	140,80	1,68	494,77	FMA
	6000,00	281,60	422,40	473,94	140,80	1,68	440,79	MV

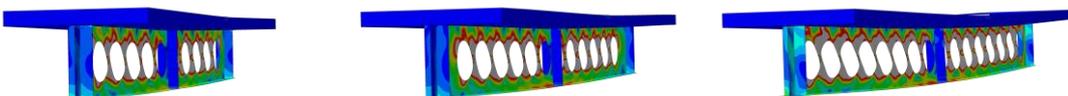
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.32:** Seção W360x44,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS

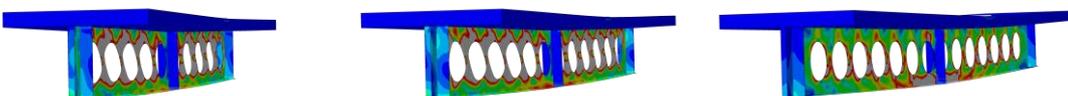
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

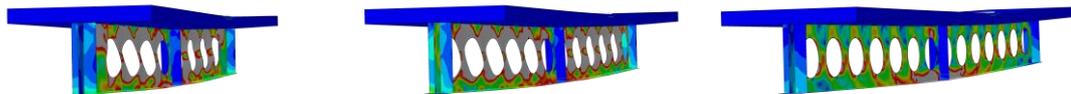


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

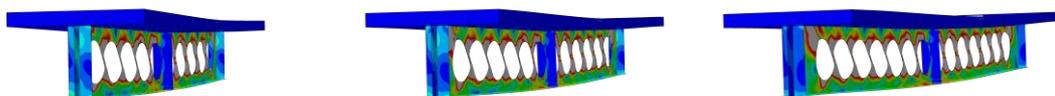
**Apêndice A.33:** Seção W360x44,0  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	316,80	380,20	507,20	63,40	1,60	320,19	FMA
	5000,00	316,80	380,20	507,20	63,40	1,60	307,58	FMA
	6000,00	316,80	380,20	507,20	63,40	1,60	291,82	FMA
1,3	4000,00	316,80	411,80	503,11	95,00	1,59	432,24	FMA
	5000,00	316,80	411,80	503,11	95,00	1,59	352,89	FMA
	6000,00	316,80	411,80	503,11	95,00	1,59	348,35	FMA
1,4	4000,00	316,80	443,50	497,18	126,70	1,57	443,11	FMA
	5000,00	316,80	443,50	497,18	126,70	1,57	433,32	FMA
	6000,00	316,80	443,50	497,18	126,70	1,57	423,41	FMA
1,5	4000,00	316,80	475,20	489,18	158,40	1,54	494,48	FMA
	5000,00	316,80	475,20	489,18	158,40	1,54	484,40	FMA
	6000,00	316,80	475,20	489,18	158,40	1,54	441,41	MV

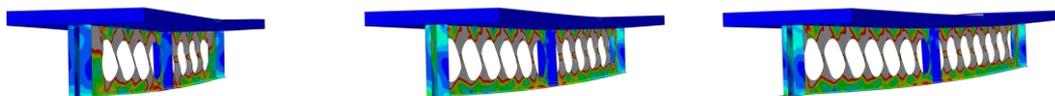
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.34:** Seção W360x44,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS

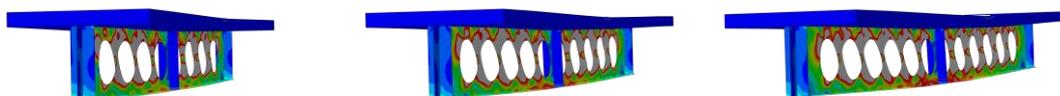
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

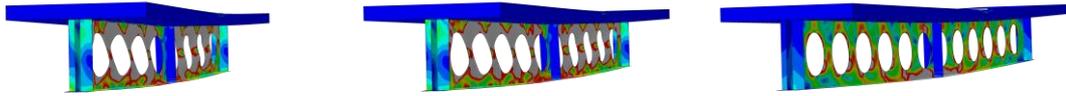


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

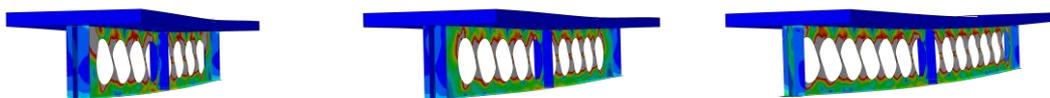
**Apêndice A.35:** Seção W360x44,0  $D_o/d = 1,0$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	352,00	422,40	524,44	70,40	1,49	340,70	FMA
	5000,00	352,00	422,40	524,44	70,40	1,49	306,74	FMA
	6000,00	352,00	422,40	524,44	70,40	1,49	250,53	FMA
1,3	4000,00	352,00	457,60	519,89	105,60	1,48	367,38	FMA
	5000,00	352,00	457,60	519,89	105,60	1,48	357,88	FMA
	6000,00	352,00	457,60	519,89	105,60	1,48	341,81	FMA
1,4	4000,00	352,00	492,80	513,31	140,80	1,46	400,94	FMA
	5000,00	352,00	492,80	513,31	140,80	1,46	397,67	FMA
	6000,00	352,00	492,80	513,31	140,80	1,46	387,93	FMA
1,5	4000,00	352,00	528,00	504,42	176,00	1,43	524,73	FMA
	5000,00	352,00	528,00	504,42	176,00	1,43	482,70	FMA
	6000,00	352,00	528,00	504,42	176,00	1,43	441,23	MV

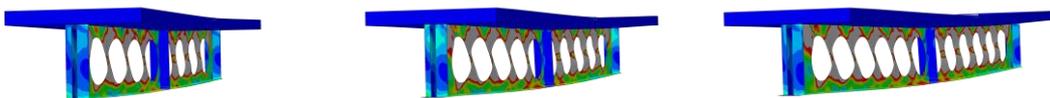
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.36:** Seção W360x44,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS

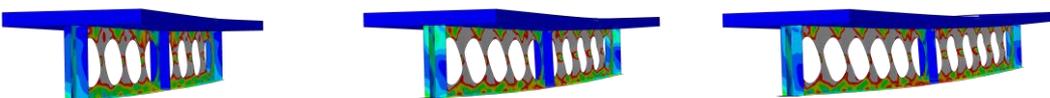
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

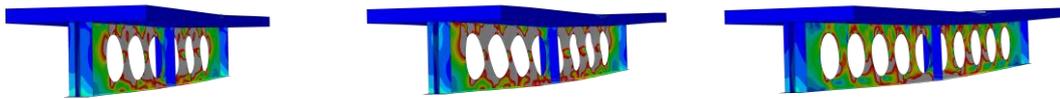


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

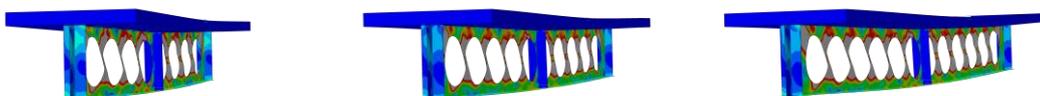
**Apêndice A.37:** Seção W360x44,0  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	387,20	464,60	541,69	77,40	1,40	294,00	FMA
	5000,00	387,20	464,60	541,69	77,40	1,40	274,68	FMA
	6000,00	387,20	464,60	541,69	77,40	1,40	255,40	FMA
1,3	4000,00	387,20	503,40	536,68	116,20	1,39	327,00	FMA
	5000,00	387,20	503,40	536,68	116,20	1,39	315,86	FMA
	6000,00	387,20	503,40	536,68	116,20	1,39	305,70	FMA
1,4	4000,00	387,20	542,10	529,43	154,90	1,37	430,01	FMA
	5000,00	387,20	542,10	529,43	154,90	1,37	403,73	FMA
	6000,00	387,20	542,10	529,43	154,90	1,37	383,14	FMA
1,5	4000,00	387,20	580,80	519,66	193,60	1,34	479,09	FMA
	5000,00	387,20	580,80	519,66	193,60	1,34	451,51	FMA
	6000,00	387,20	580,80	519,66	193,60	1,34	417,02	MV+FMA

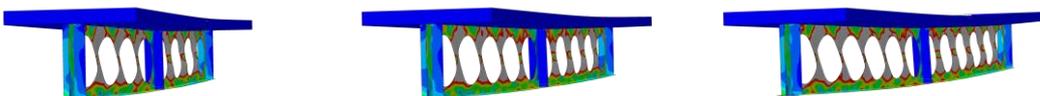
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.38:** Seção W360x44,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS

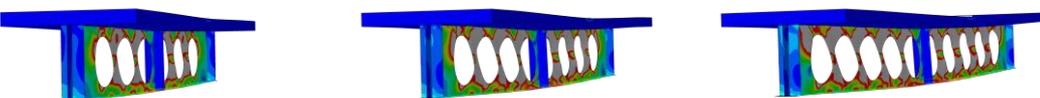
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

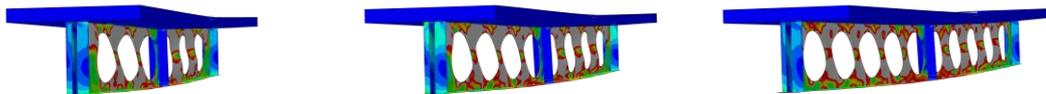


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

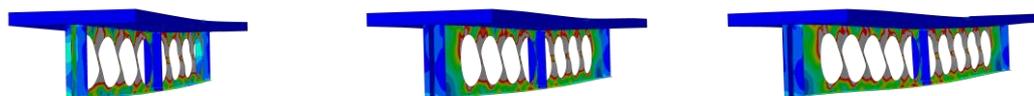
**Apêndice A.39:** Seção W360x44,0  $D_o/d = 1,2$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	422,40	506,90	558,93	84,50	1,32	258,90	FMA
	5000,00	422,40	506,90	558,93	84,50	1,32	295,02	FMA
	6000,00	422,40	506,90	558,93	84,50	1,32	264,09	FMA
1,3	4000,00	422,40	549,10	553,48	126,70	1,31	367,02	FMA
	5000,00	422,40	549,10	553,48	126,70	1,31	336,70	FMA
	6000,00	422,40	549,10	553,48	126,70	1,31	313,78	FMA
1,4	4000,00	422,40	591,40	545,56	169,00	1,29	395,33	FMA
	5000,00	422,40	591,40	545,56	169,00	1,29	374,01	MV
	6000,00	422,40	591,40	545,56	169,00	1,29	353,03	FMA
1,5	4000,00	422,40	633,60	534,90	211,20	1,27	429,65	FMA
	5000,00	422,40	633,60	534,90	211,20	1,27	402,60	FMA
	6000,00	422,40	633,60	534,90	211,20	1,27	415,56	MV+FMA

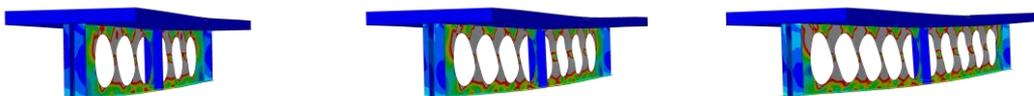
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.40:** Seção W360x44,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS

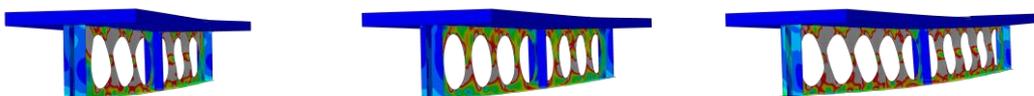
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

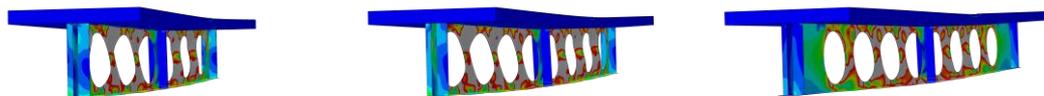


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

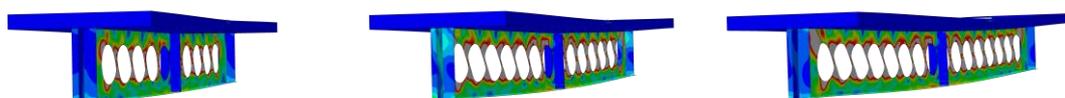
**Apêndice A.41:** Seção W360x51,0  $D_o/d = 0,8$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	284,00	340,80	494,13	56,80	1,74	399,45	FMA
	5000,00	284,00	340,80	494,13	56,80	1,74	336,39	MV+FMA
	6000,00	284,00	340,80	494,13	56,80	1,74	326,12	FMA
1,3	4000,00	284,00	369,20	490,46	85,20	1,73	429,25	FMA
	5000,00	284,00	369,20	490,46	85,20	1,73	426,66	MV+FMA
	6000,00	284,00	369,20	490,46	85,20	1,73	391,66	FMA
1,4	4000,00	284,00	397,60	485,15	113,60	1,71	468,24	FMA
	5000,00	284,00	397,60	485,15	113,60	1,71	475,03	MV+FMA
	6000,00	284,00	397,60	485,15	113,60	1,71	472,46	MV+FMA
1,5	4000,00	284,00	426,00	477,98	142,00	1,68	578,85	FMA
	5000,00	284,00	426,00	477,98	142,00	1,68	531,97	FMA
	6000,00	284,00	426,00	477,98	142,00	1,68	489,20	MV

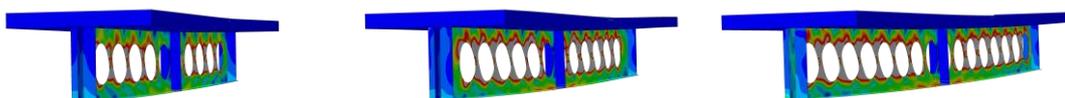
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.42:** Seção W360x51,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS

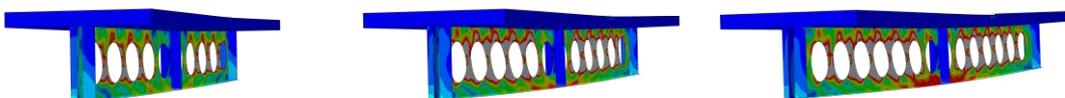
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

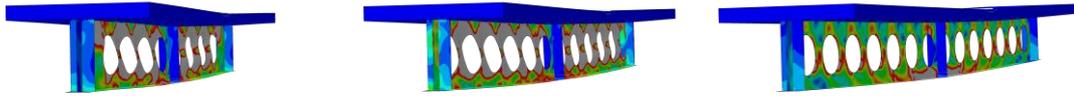


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

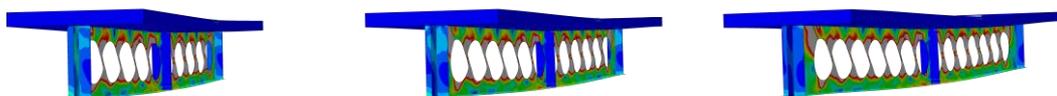
**Apêndice A.43:** Seção W360x51,0  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	$L$ [mm]	$D_o$ [mm]	$P$ [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	319,50	383,40	511,52	63,90	1,60	344,80	FMA
	5000,00	319,50	383,40	511,52	63,90	1,60	327,91	FMA
	6000,00	319,50	383,40	511,52	63,90	1,60	313,18	FMA
1,3	4000,00	319,50	415,40	507,38	95,90	1,59	440,66	MV+FMA
	5000,00	319,50	415,40	507,38	95,90	1,59	377,00	FMA
	6000,00	319,50	415,40	507,38	95,90	1,59	375,64	FMA
1,4	4000,00	319,50	447,30	501,41	127,80	1,57	494,96	FMA
	5000,00	319,50	447,30	501,41	127,80	1,57	464,43	MV+FMA
	6000,00	319,50	447,30	501,41	127,80	1,57	453,92	MV+FMA
1,5	4000,00	319,50	479,20	493,36	159,70	1,54	510,46	MV+FMA
	5000,00	319,50	479,20	493,36	159,70	1,54	523,00	FMA
	6000,00	319,50	479,20	493,36	159,70	1,54	487,26	MV

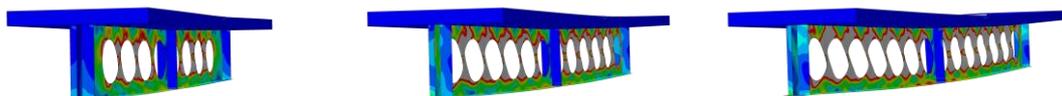
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.44:** Seção W360x51,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS

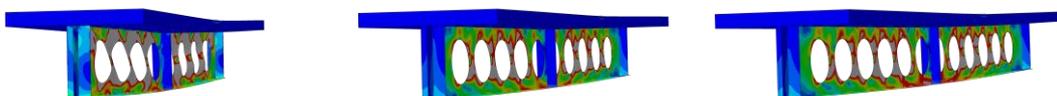
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

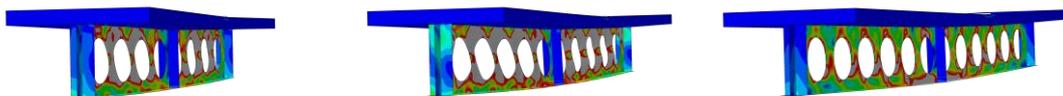


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

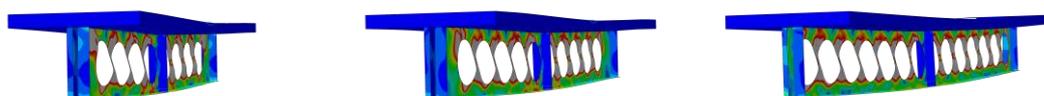
**Apêndice A.45:** Seção W360x51,0  $D_o/d = 1,0$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	355,00	426,00	528,91	71,00	1,49	377,41	FMA
	5000,00	355,00	426,00	528,91	71,00	1,49	331,91	FMA
	6000,00	355,00	426,00	528,91	71,00	1,49	269,36	FMA
1,3	4000,00	355,00	461,50	524,32	106,50	1,48	405,91	FMA
	5000,00	355,00	461,50	524,32	106,50	1,48	382,31	FMA
	6000,00	355,00	461,50	524,32	106,50	1,48	369,25	MV+FMA
1,4	4000,00	355,00	497,00	517,68	142,00	1,46	442,88	FMA
	5000,00	355,00	497,00	517,68	142,00	1,46	426,85	FMA
	6000,00	355,00	497,00	517,68	142,00	1,46	418,00	FMA
1,5	4000,00	355,00	532,50	508,72	177,50	1,43	554,01	FMA
	5000,00	355,00	532,50	508,72	177,50	1,43	520,70	MV+FMA
	6000,00	355,00	532,50	508,72	177,50	1,43	480,97	MV+FMA

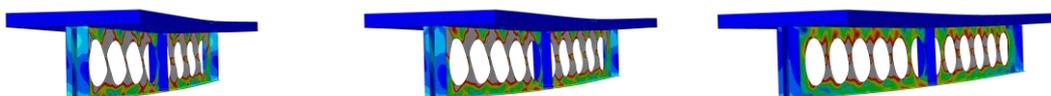
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.46:** Seção W360x51,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS

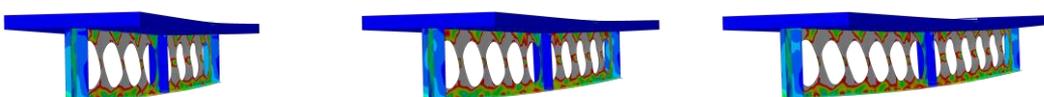
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

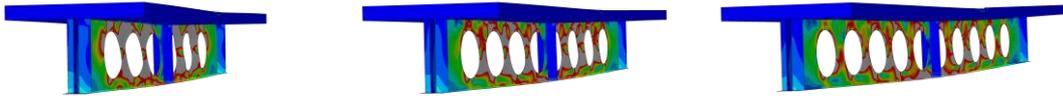


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

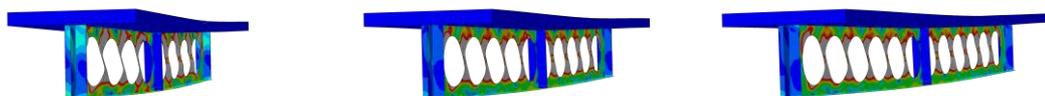
**Apêndice A.47:** Seção W360x51,0  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	390,50	468,60	546,31	78,10	1,40	322,77	FMA
	5000,00	390,50	468,60	546,31	78,10	1,40	294,46	FMA
	6000,00	390,50	468,60	546,31	78,10	1,40	275,53	FMA
1,3	4000,00	390,50	507,70	541,25	117,20	1,39	356,41	FMA
	5000,00	390,50	507,70	541,25	117,20	1,39	341,41	FMA
	6000,00	390,50	507,70	541,25	117,20	1,39	332,76	FMA
1,4	4000,00	390,50	546,70	533,95	156,20	1,37	487,27	FMA
	5000,00	390,50	546,70	533,95	156,20	1,37	434,58	FMA
	6000,00	390,50	546,70	533,95	156,20	1,37	413,19	FMA
1,5	4000,00	390,50	585,80	524,08	195,30	1,34	509,90	FMA
	5000,00	390,50	585,80	524,08	195,30	1,34	487,77	FMA
	6000,00	390,50	585,80	524,08	195,30	1,34	456,77	MV+FMA

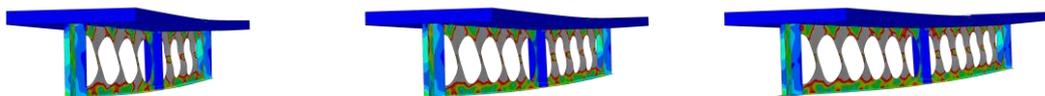
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.48:** Seção W360x51,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS

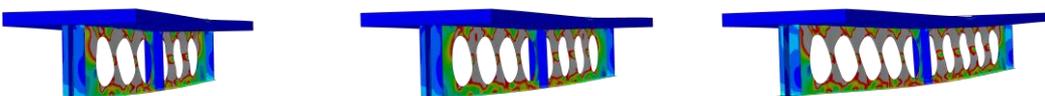
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

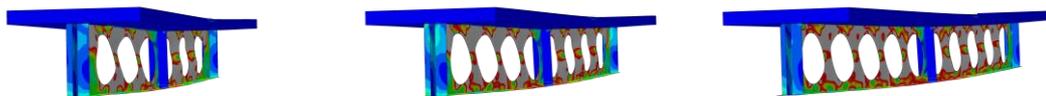


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

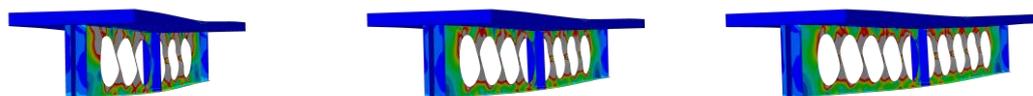
**Apêndice A.49:** Seção W360x51,0  $D_o/d = 1,2$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	426,00	511,20	563,70	85,20	1,32	384,64	FMA
	5000,00	426,00	511,20	563,70	85,20	1,32	313,23	FMA
	6000,00	426,00	511,20	563,70	85,20	1,32	283,92	FMA
1,3	4000,00	426,00	553,80	558,19	127,80	1,31	414,48	FMA
	5000,00	426,00	553,80	558,19	127,80	1,31	360,61	FMA
	6000,00	426,00	553,80	558,19	127,80	1,31	339,91	FMA
1,4	4000,00	426,00	596,40	550,22	170,40	1,29	444,17	FMA
	5000,00	426,00	596,40	550,22	170,40	1,29	404,04	FMA
	6000,00	426,00	596,40	550,22	170,40	1,29	381,95	FMA
1,5	4000,00	426,00	639,00	539,46	213,00	1,27	462,13	FMA
	5000,00	426,00	639,00	539,46	213,00	1,27	426,63	FMA
	6000,00	426,00	639,00	539,46	213,00	1,27	452,03	MV+FMA

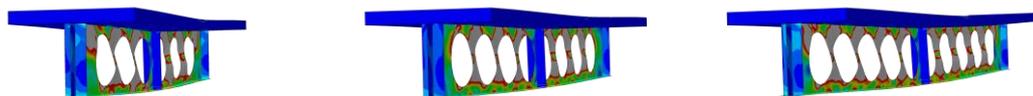
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.50:** Seção W360x51,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS

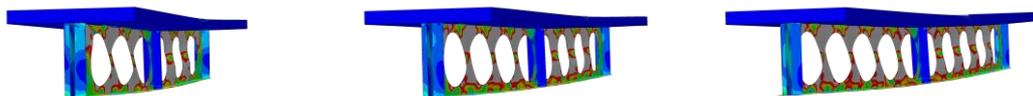
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

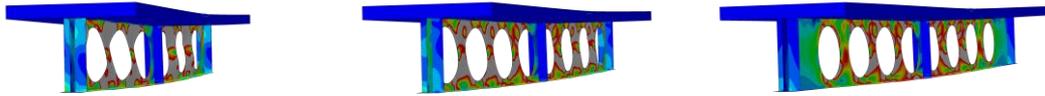


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

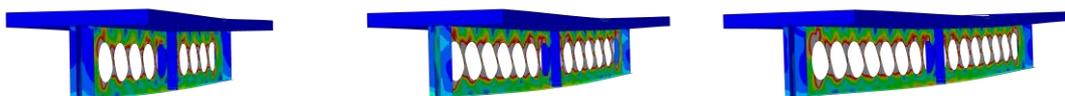
**Apêndice A.51:** Seção W360x57,8  $D_o/d = 0,8$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	286,40	343,70	498,30	57,30	1,74	451,31	FMA
	5000,00	286,40	343,70	498,30	57,30	1,74	389,57	FMA
	6000,00	286,40	343,70	498,30	57,30	1,74	373,73	FMA
1,3	4000,00	286,40	372,30	494,61	85,90	1,73	517,13	FMA
	5000,00	286,40	372,30	494,61	85,90	1,73	509,93	FMA
	6000,00	286,40	372,30	494,61	85,90	1,73	453,41	FMA
1,4	4000,00	286,40	401,00	489,24	114,60	1,71	561,62	FMA
	5000,00	286,40	401,00	489,24	114,60	1,71	563,30	FMA
	6000,00	286,40	401,00	489,24	114,60	1,71	545,89	MV
1,5	4000,00	286,40	429,60	482,01	143,20	1,68	668,08	FMA
	5000,00	286,40	429,60	482,01	143,20	1,68	615,89	MV
	6000,00	286,40	429,60	482,01	143,20	1,68	543,72	MV

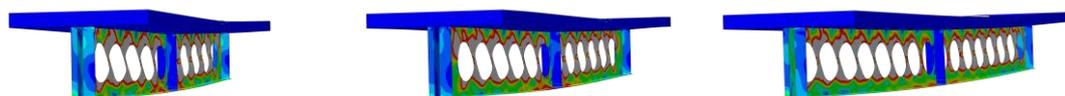
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.52:** Seção W360x57,7  $D_o/d = 0,8$  Modos de Falha ABAQUS

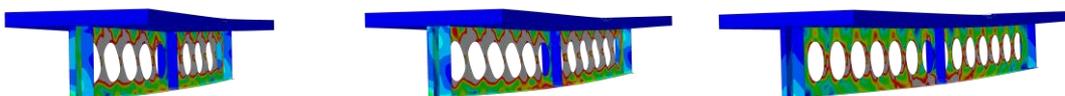
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

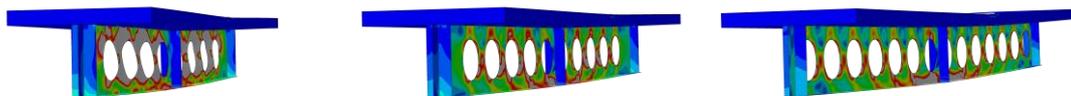


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

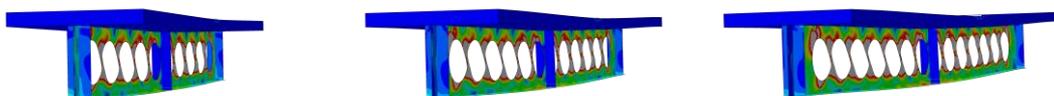
**Apêndice A.53:** Seção W360x57,8  $D_o/d = 0,9$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	322,20	386,60	515,85	64,40	1,60	387,42	FMA
	5000,00	322,20	386,60	515,85	64,40	1,60	374,31	FMA
	6000,00	322,20	386,60	515,85	64,40	1,60	356,92	FMA
1,3	4000,00	322,20	418,90	511,67	96,70	1,59	531,93	FMA
	5000,00	322,20	418,90	511,67	96,70	1,59	436,41	MV+FMA
	6000,00	322,20	418,90	511,67	96,70	1,59	435,49	FMA
1,4	4000,00	322,20	451,10	505,65	128,90	1,57	576,85	FMA
	5000,00	322,20	451,10	505,65	128,90	1,57	561,51	FMA
	6000,00	322,20	451,10	505,65	128,90	1,57	541,59	FMA
1,5	4000,00	322,20	483,30	497,52	161,10	1,54	617,81	FMA
	5000,00	322,20	483,30	497,52	161,10	1,54	612,05	FMA
	6000,00	322,20	483,30	497,52	161,10	1,54	550,86	MV

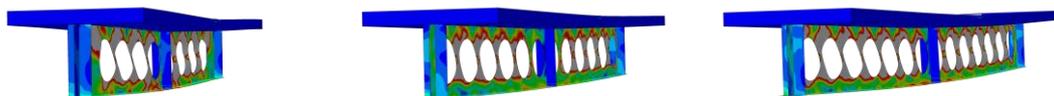
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.54:** Seção W360x57,7  $D_o/d = 0,9$  Modos de Falha ABAQUS

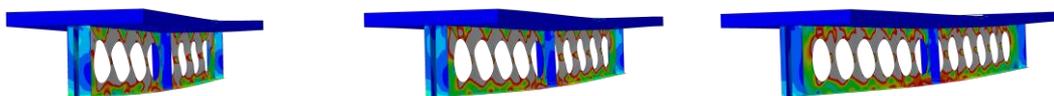
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

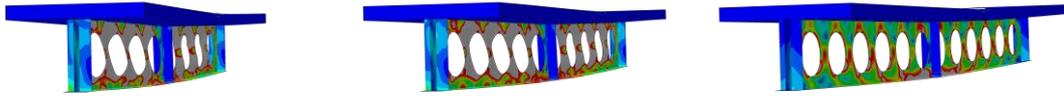


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

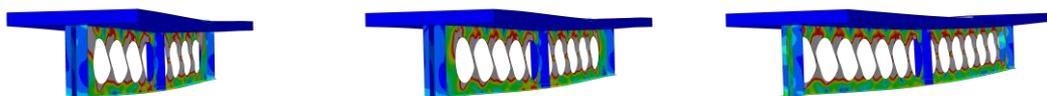
**Apêndice A.55:** Seção W360x57,8  $D_o/d = 1,0$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	358,00	429,60	533,38	71,60	1,49	434,66	FMA
	5000,00	358,00	429,60	533,38	71,60	1,49	393,64	FMA
	6000,00	358,00	429,60	533,38	71,60	1,49	313,33	FMA
1,3	4000,00	358,00	465,40	528,76	107,40	1,48	447,92	MV+FMA
	5000,00	358,00	465,40	528,76	107,40	1,48	442,78	FMA
	6000,00	358,00	465,40	528,76	107,40	1,48	429,24	FMA
1,4	4000,00	358,00	501,20	522,06	143,20	1,46	516,68	FMA
	5000,00	358,00	501,20	522,06	143,20	1,46	510,73	FMA
	6000,00	358,00	501,20	522,06	143,20	1,46	499,74	FMA
1,5	4000,00	358,00	537,00	513,02	179,00	1,43	625,85	FMA
	5000,00	358,00	537,00	513,02	179,00	1,43	596,09	FMA
	6000,00	358,00	537,00	513,02	179,00	1,43	537,93	MV

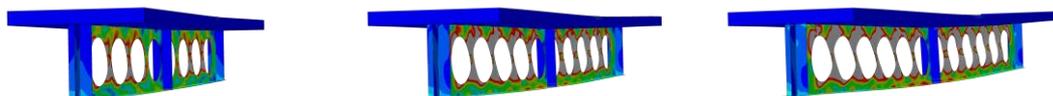
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.56:** Seção W360x57,7  $D_o/d = 1,0$  Modos de Falha ABAQUS

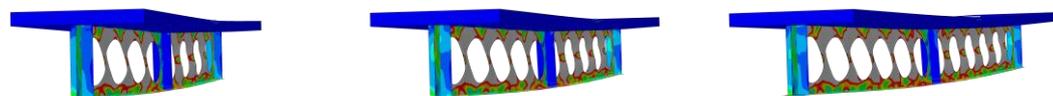
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

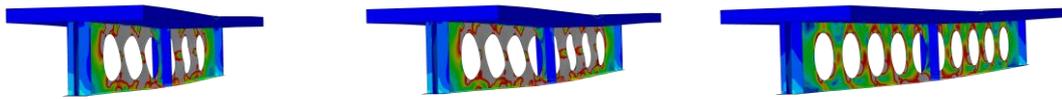


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

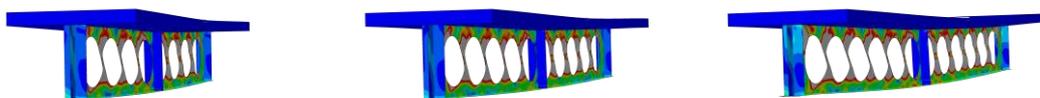
**Apêndice A.57:** Seção W360x57,8  $D_o/d = 1,1$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	393,80	472,60	550,92	78,80	1,40	358,22	FMA
	5000,00	393,80	472,60	550,92	78,80	1,40	336,60	FMA
	6000,00	393,80	472,60	550,92	78,80	1,40	322,31	FMA
1,3	4000,00	393,80	511,90	545,84	118,10	1,39	409,25	MV+FMA
	5000,00	393,80	511,90	545,84	118,10	1,39	448,48	FMA
	6000,00	393,80	511,90	545,84	118,10	1,39	426,77	FMA
1,4	4000,00	393,80	551,30	538,47	157,50	1,37	555,33	FMA
	5000,00	393,80	551,30	538,47	157,50	1,37	527,29	FMA
	6000,00	393,80	551,30	538,47	157,50	1,37	498,35	FMA
1,5	4000,00	393,80	590,70	528,52	196,90	1,34	580,64	FMA
	5000,00	393,80	590,70	528,52	196,90	1,34	564,47	FMA
	6000,00	393,80	590,70	528,52	196,90	1,34	523,81	MV+FMA

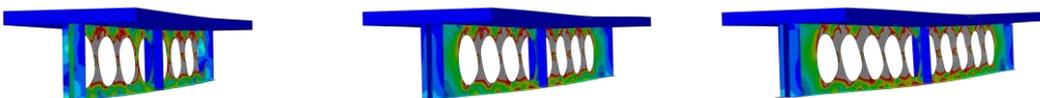
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.58:** Seção W360x57,7  $D_o/d = 1,1$  Modos de Falha ABAQUS

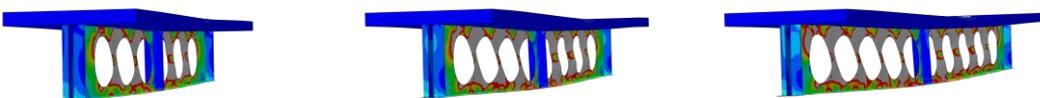
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$

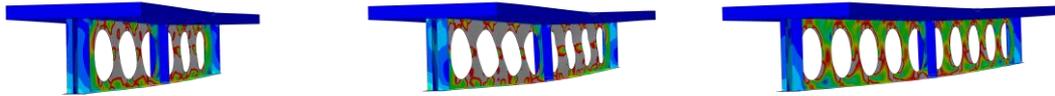


$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

$P/D_o = 1,5 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



Fonte: Autor (2025)

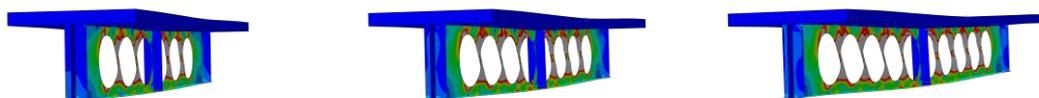
**Apêndice A.59:** Seção W360x57,8  $D_o/d = 1,2$

$P/D_o$	L [mm]	$D_o$ [mm]	P [mm]	$d_g$ [mm]	$b_w$ [mm]	$d_g/D_o$	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
1,2	4000,00	429,60	515,50	568,46	85,90	1,32	394,11	FMA
	5000,00	429,60	515,50	568,46	85,90	1,32	351,43	FMA
	6000,00	429,60	515,50	568,46	85,90	1,32	328,17	FMA
1,3	4000,00	429,60	558,50	562,90	128,90	1,31	447,44	FMA
	5000,00	429,60	558,50	562,90	128,90	1,31	419,90	FMA
	6000,00	429,60	558,50	562,90	128,90	1,31	398,42	FMA
1,4	4000,00	429,60	601,40	554,88	171,80	1,29	511,72	FMA
	5000,00	429,60	601,40	554,88	171,80	1,29	488,09	FMA
	6000,00	429,60	601,40	554,88	171,80	1,29	453,28	FMA
1,5	4000,00	429,60	644,40	544,02	214,80	1,27	527,87	FMA
	5000,00	429,60	644,40	544,02	214,80	1,27	508,50	FMA
	6000,00	429,60	644,40	544,02	214,80	1,27	525,38	FMA

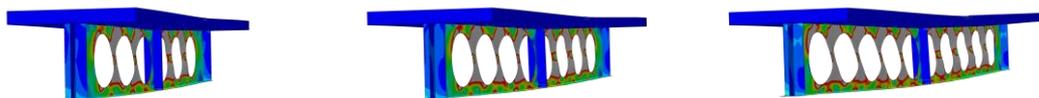
Fonte: Autor (2025)

**Apêndice A.60:** Seção W360x57,7  $D_o/d = 1,2$  Modos de Falha ABAQUS

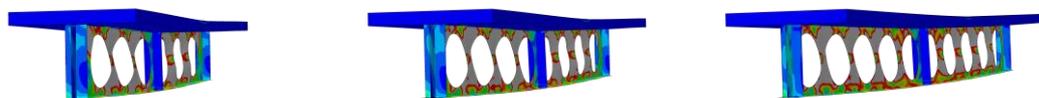
$P/D_o = 1,2 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,2 / L = 6000\text{mm}$



$P/D_o = 1,3 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,3 / L = 6000\text{mm}$



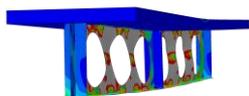
$P/D_o = 1,4 / L = 4000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 5000\text{mm}$      $P/D_o = 1,4 / L = 6000\text{mm}$



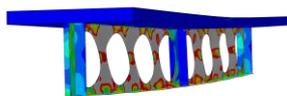
## APENDICE A: Modos de falha e carga crítica (Paramétrica I)

---

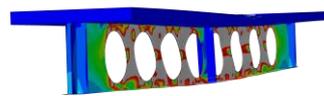
$P/Do = 1,5 / L = 4000\text{mm}$



$P/Do = 1,5 / L = 5000\text{mm}$



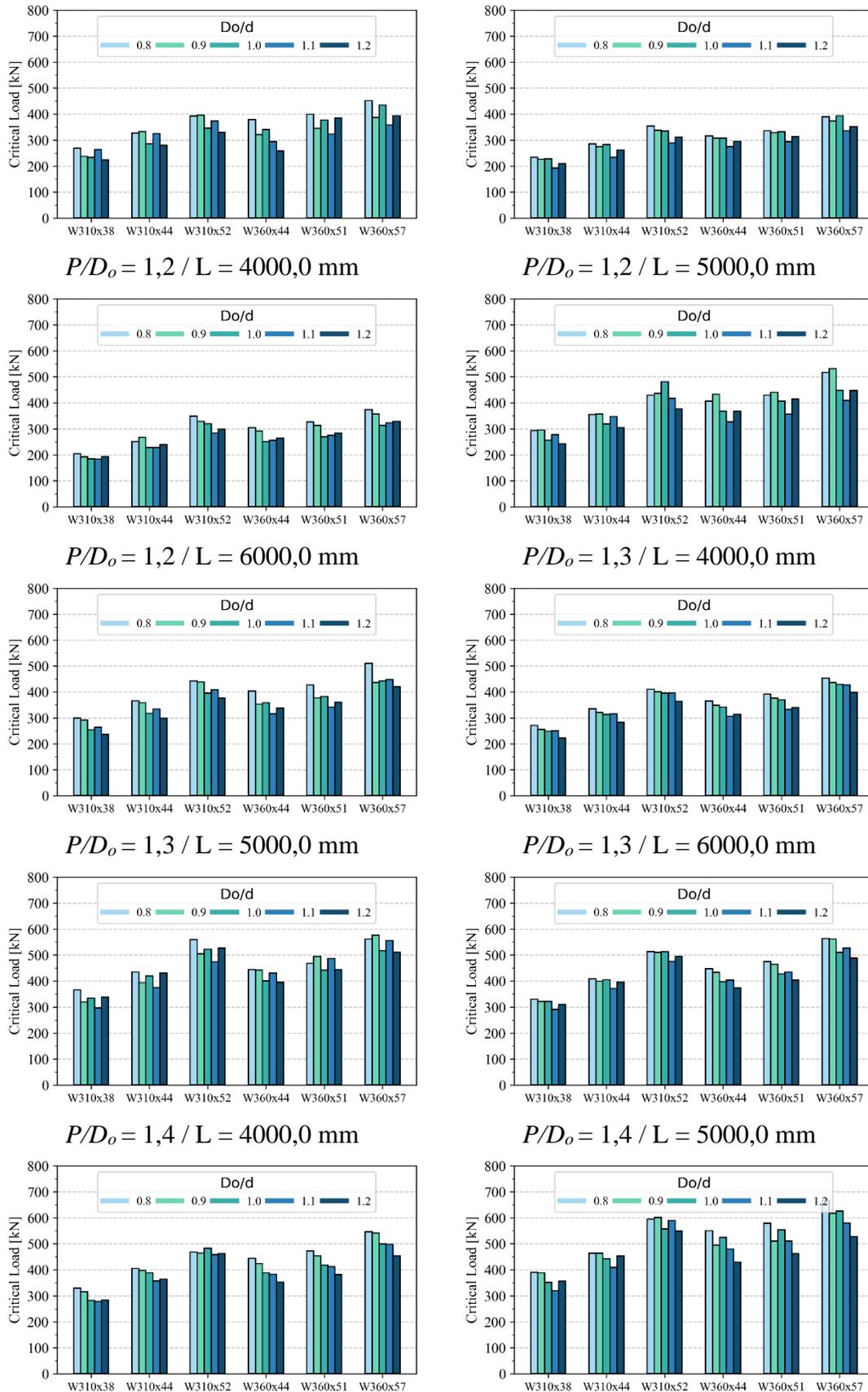
$P/Do = 1,5 / L = 6000\text{mm}$



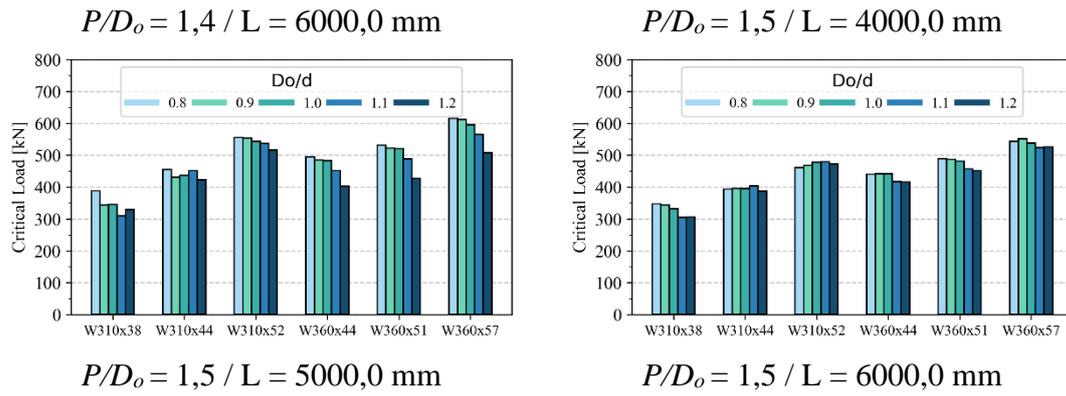
*Fonte: Autor (2025)*

APÊNDICE B: Gráficos da carga crítica (Paramétrica I)

Apêndice B.1: Evolução da carga crítica em função dos Perfis



APÊNDICE B: Gráficos da carga crítica (Paramétrica I)



Fonte: Autor (2025)

**APÊNDICE C: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica I)**

**Apêndice C.1:**Seção W310x38,5 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal ( $V_h$ )

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	75,57	41,34	75,57	154,83	44,26
	5000,00	75,57	41,34	75,57	134,69	45,57
	6000,00	75,57	41,34	75,57	117,61	40,01
1,3	4000,00	109,82	65,59	109,82	183,92	68,18
	5000,00	109,82	65,59	109,82	188,22	74,15
	6000,00	109,82	65,59	109,82	169,95	61,68
1,4	4000,00	140,17	85,50	140,17	249,36	103,72
	5000,00	140,17	85,50	140,17	225,31	93,74
	6000,00	140,17	85,50	140,17	224,47	84,91
1,5	4000,00	165,90	102,52	165,90	288,27	125,63
	5000,00	165,90	102,52	165,90	286,56	121,28
	6000,00	165,90	102,52	165,90	256,61	71,58

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.2:**Seção W310x38,5 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical ( $V_v$ )

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	62,33	111,12	134,27
	5000,00	62,33	111,12	116,80
	6000,00	62,33	111,12	101,99
1,3	4000,00	90,79	145,53	146,40
	5000,00	90,79	145,53	149,83
	6000,00	90,79	145,53	135,29
1,4	4000,00	116,29	163,37	182,83
	5000,00	116,29	163,37	165,20
	6000,00	116,29	163,37	164,58
1,5	4000,00	138,31	166,32	195,09
	5000,00	138,31	166,32	193,93
	6000,00	138,31	166,32	173,66

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.3:**Seção W310x38,5 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	71,80	43,54	71,80	149,00	38,50
	5000,00	71,80	43,54	71,80	141,95	48,14
	6000,00	71,80	43,54	71,80	120,20	40,93
1,3	4000,00	103,87	63,49	103,87	201,76	76,75
	5000,00	103,87	63,49	103,87	199,58	76,89
	6000,00	103,87	63,49	103,87	174,82	68,68
1,4	4000,00	131,86	80,37	131,86	237,78	105,83
	5000,00	131,86	80,37	131,86	239,28	104,92
	6000,00	131,86	80,37	131,86	234,39	99,74
1,5	4000,00	155,15	96,81	155,15	313,10	135,42
	5000,00	155,15	96,81	155,15	277,79	124,32
	6000,00	155,15	96,81	155,15	277,08	96,00

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.4:**Seção W310x38,5 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	60,08	106,01	118,60
	5000,00	60,08	106,01	112,98
	6000,00	60,08	106,01	95,67
1,3	4000,00	87,22	123,56	147,32
	5000,00	87,22	123,56	145,75
	6000,00	87,22	123,56	127,66
1,4	4000,00	111,24	123,44	159,79
	5000,00	111,24	123,44	160,81
	6000,00	111,24	123,44	157,52
1,5	4000,00	131,68	125,08	194,01
	5000,00	131,68	125,08	172,13
	6000,00	131,68	125,08	171,69

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.5:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	67,45	45,64	67,45	157,73	38,95
	5000,00	67,45	45,64	67,45	153,98	45,90
	6000,00	67,45	45,64	67,45	124,33	44,56
1,3	4000,00	97,30	64,68	97,30	189,06	81,56
	5000,00	97,30	64,68	97,30	187,83	79,70
	6000,00	97,30	64,68	97,30	183,07	76,01
1,4	4000,00	123,10	82,37	123,10	267,87	106,72
	5000,00	123,10	82,37	123,10	257,90	107,26
	6000,00	123,10	82,37	123,10	225,78	97,12
1,5	4000,00	144,33	166,97	144,33	306,90	139,74
	5000,00	144,33	166,97	144,33	300,88	136,54
	6000,00	144,33	166,97	144,33	289,15	119,07

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.6:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	57,37	90,47	116,54
	5000,00	57,37	90,47	113,77
	6000,00	57,37	90,47	91,86
1,3	4000,00	83,08	94,67	128,08
	5000,00	83,08	94,67	127,25
	6000,00	83,08	94,67	124,02
1,4	4000,00	105,64	98,48	166,89
	5000,00	105,64	98,48	160,67
	6000,00	105,64	98,48	140,66
1,5	4000,00	124,61	99,43	176,09
	5000,00	124,61	99,43	172,64
	6000,00	124,61	99,43	165,91

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.7:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	63,14	45,20	63,14	189,96	37,41
	5000,00	63,14	45,20	63,14	138,43	45,90
	6000,00	63,14	45,20	63,14	132,11	52,30
1,3	4000,00	90,92	61,29	90,92	218,41	79,66
	5000,00	90,92	61,29	90,92	208,27	81,95
	6000,00	90,92	61,29	90,92	196,82	83,56
1,4	4000,00	114,78	78,34	114,78	254,29	111,22
	5000,00	114,78	78,34	114,78	249,33	111,54
	6000,00	114,78	78,34	114,78	239,22	106,06
1,5	4000,00	134,27	180,18	134,27	298,25	142,96
	5000,00	134,27	180,18	134,27	288,16	135,71
	6000,00	134,27	180,18	134,27	284,06	129,99

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.8:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	54,54	82,73	131,44
	5000,00	54,54	82,73	95,79
	6000,00	54,54	82,73	91,42
1,3	4000,00	78,83	90,50	138,51
	5000,00	78,83	90,50	132,09
	6000,00	78,83	90,50	124,82
1,4	4000,00	100,01	92,95	148,18
	5000,00	100,01	92,95	145,30
	6000,00	100,01	92,95	139,40
1,5	4000,00	117,67	93,15	159,89
	5000,00	117,67	93,15	154,49
	6000,00	117,67	93,15	152,30

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.9:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	59,11	45,82	59,11	171,53	51,60
	5000,00	59,11	45,82	59,11	160,93	48,63
	6000,00	59,11	45,82	59,11	147,58	56,13
1,3	4000,00	85,02	100,49	85,02	203,48	79,10
	5000,00	85,02	100,49	85,02	197,37	85,36
	6000,00	85,02	100,49	85,02	185,53	79,72
1,4	4000,00	107,18	145,81	107,18	307,98	112,63
	5000,00	107,18	145,81	107,18	281,86	115,71
	6000,00	107,18	145,81	107,18	259,09	112,28
1,5	4000,00	125,19	192,97	125,19	353,36	144,86
	5000,00	125,19	192,97	125,19	326,69	142,51
	6000,00	125,19	192,97	125,19	303,62	137,75

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.10:**Seção W310x38,5 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	51,76	80,40	111,97
	5000,00	51,76	80,40	105,05
	6000,00	51,76	80,40	96,33
1,3	4000,00	74,72	86,25	121,67
	5000,00	74,72	86,25	118,02
	6000,00	74,72	86,25	110,93
1,4	4000,00	94,63	87,74	169,09
	5000,00	94,63	87,74	154,75
	6000,00	94,63	87,74	142,24
1,5	4000,00	111,12	87,45	178,30
	5000,00	111,12	87,45	164,84
	6000,00	111,12	87,45	153,20

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.11:**Seção W310x44,5 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	100,31	47,52	100,31	188,89	56,43
	5000,00	100,31	47,52	100,31	165,12	57,25
	6000,00	100,31	47,52	100,31	144,76	58,69
1,3	4000,00	146,55	81,38	146,55	223,63	90,62
	5000,00	146,55	81,38	146,55	230,71	95,42
	6000,00	146,55	81,38	146,55	210,76	80,32
1,4	4000,00	188,58	112,56	188,58	297,30	118,65
	5000,00	188,58	112,56	188,58	279,53	115,84
	6000,00	188,58	112,56	188,58	276,99	81,74
1,5	4000,00	225,02	137,77	225,02	343,61	138,25
	5000,00	225,02	137,77	225,02	336,67	128,10
	6000,00	225,02	137,77	225,02	291,89	90,98

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.12:**Seção W310x44,5 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	82,27	132,50	163,33
	5000,00	82,27	132,50	142,78
	6000,00	82,27	132,50	125,19
1,3	4000,00	120,21	177,88	177,54
	5000,00	120,21	177,88	183,15
	6000,00	120,21	177,88	167,31
1,4	4000,00	154,85	206,45	217,33
	5000,00	154,85	206,45	204,34
	6000,00	154,85	206,45	202,49
1,5	4000,00	185,18	217,44	231,88
	5000,00	185,18	217,44	227,19
	6000,00	185,18	217,44	196,97

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.13:**Seção W310x44,5 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	97,85	52,44	97,85	209,80	56,82
	5000,00	97,85	52,44	97,85	172,83	62,20
	6000,00	97,85	52,44	97,85	168,00	65,11
1,3	4000,00	142,28	83,34	142,28	245,09	100,69
	5000,00	142,28	83,34	142,28	246,16	104,38
	6000,00	142,28	83,34	142,28	220,00	87,27
1,4	4000,00	181,67	108,66	181,67	293,51	127,84
	5000,00	181,67	108,66	181,67	297,69	131,05
	6000,00	181,67	108,66	181,67	296,50	110,48
1,5	4000,00	214,96	130,07	214,96	374,96	158,67
	5000,00	214,96	130,07	214,96	348,00	152,63
	6000,00	214,96	130,07	214,96	320,88	110,28

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.14:**Seção W310x44,5 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	80,69	130,28	166,56
	5000,00	80,69	130,28	137,21
	6000,00	80,69	130,28	133,38
1,3	4000,00	117,60	159,13	178,49
	5000,00	117,60	159,13	179,27
	6000,00	117,60	159,13	160,22
1,4	4000,00	150,69	165,42	196,70
	5000,00	150,69	165,42	199,50
	6000,00	150,69	165,42	198,70
1,5	4000,00	179,16	170,95	231,71
	5000,00	179,16	170,95	215,04
	6000,00	179,16	170,95	198,28

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.15:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	93,66	56,37	93,66	194,25	49,52
	5000,00	93,66	56,37	93,66	192,12	61,86
	6000,00	93,66	56,37	93,66	154,52	58,30
1,3	4000,00	135,56	87,76	135,56	235,49	105,03
	5000,00	135,56	87,76	135,56	234,85	101,34
	6000,00	135,56	87,76	135,56	231,24	97,18
1,4	4000,00	172,17	111,09	172,17	337,40	139,35
	5000,00	172,17	111,09	172,17	325,85	142,22
	6000,00	172,17	111,09	172,17	312,84	130,04
1,5	4000,00	202,71	191,84	202,71	387,02	177,69
	5000,00	202,71	191,84	202,71	381,60	171,70
	6000,00	202,71	191,84	202,71	345,51	129,05

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.16:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	78,21	116,74	143,14
	5000,00	78,21	116,74	141,57
	6000,00	78,21	116,74	113,86
1,3	4000,00	113,58	127,96	159,11
	5000,00	113,58	127,96	158,68
	6000,00	113,58	127,96	156,24
1,4	4000,00	144,94	135,76	209,62
	5000,00	144,94	135,76	202,45
	6000,00	144,94	135,76	194,37
1,5	4000,00	171,65	138,69	221,45
	5000,00	171,65	138,69	218,34
	6000,00	171,65	138,69	197,69

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.17:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	88,76	57,81	88,76	235,53	61,22
	5000,00	88,76	57,81	88,76	169,61	63,36
	6000,00	88,76	57,81	88,76	164,96	65,09
1,3	4000,00	128,05	83,15	128,05	274,86	102,52
	5000,00	128,05	83,15	128,05	263,88	107,66
	6000,00	128,05	83,15	128,05	248,81	109,20
1,4	4000,00	162,08	105,64	162,08	322,18	148,26
	5000,00	162,08	105,64	162,08	319,88	144,75
	6000,00	162,08	105,64	162,08	307,06	136,30
1,5	4000,00	190,22	207,09	190,22	383,22	184,01
	5000,00	190,22	207,09	190,22	421,83	176,06
	6000,00	190,22	207,09	190,22	378,14	142,16

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.18:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	75,20	109,68	162,53
	5000,00	75,20	109,68	117,05
	6000,00	75,20	109,68	113,84
1,3	4000,00	108,90	123,82	173,84
	5000,00	108,90	123,82	166,89
	6000,00	108,90	123,82	157,37
1,4	4000,00	138,54	129,27	187,24
	5000,00	138,54	129,27	185,91
	6000,00	138,54	129,27	178,46
1,5	4000,00	163,58	130,80	204,86
	5000,00	163,58	130,80	225,50
	6000,00	163,58	130,80	202,15

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.19:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	83,67	61,32	83,67	214,75	66,46
	5000,00	83,67	61,32	83,67	201,13	69,41
	6000,00	83,67	61,32	83,67	184,06	72,34
1,3	4000,00	120,61	115,48	120,61	255,09	112,66
	5000,00	120,61	115,48	120,61	250,27	110,19
	6000,00	120,61	115,48	120,61	237,11	102,44
1,4	4000,00	152,30	167,47	152,30	393,26	149,38
	5000,00	152,30	167,47	152,30	361,39	149,75
	6000,00	152,30	167,47	152,30	332,48	149,28
1,5	4000,00	178,32	221,71	178,32	449,22	187,46
	5000,00	178,32	221,71	178,32	420,45	185,13
	6000,00	178,32	221,71	178,32	384,47	165,53

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.20:**Seção W310x44,5 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	71,90	108,01	139,82
	5000,00	71,90	108,01	130,95
	6000,00	71,90	108,01	119,84
1,3	4000,00	104,03	119,12	152,12
	5000,00	104,03	119,12	149,25
	6000,00	104,03	119,12	141,40
1,4	4000,00	132,02	122,84	215,35
	5000,00	132,02	122,84	197,91
	6000,00	132,02	122,84	182,07
1,5	4000,00	155,49	123,40	226,05
	5000,00	155,49	123,40	211,58
	6000,00	155,49	123,40	193,47

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.21:**Seção W310x52,0 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	131,58	55,36	131,58	228,15	74,59
	5000,00	131,58	55,36	131,58	205,15	70,53
	6000,00	131,58	55,36	131,58	202,08	72,47
1,3	4000,00	193,81	96,20	193,81	271,06	105,46
	5000,00	193,81	96,20	193,81	279,73	111,38
	6000,00	193,81	96,20	193,81	259,54	104,36
1,4	4000,00	251,41	140,05	251,41	383,79	166,50
	5000,00	251,41	140,05	251,41	352,23	156,37
	6000,00	251,41	140,05	251,41	321,40	101,86
1,5	4000,00	303,51	184,22	303,51	441,97	200,13
	5000,00	303,51	184,22	303,51	413,35	150,61
	6000,00	303,51	184,22	303,51	342,94	115,13

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.22:**Seção W310x52,0 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	108,72	159,55	196,60
	5000,00	108,72	159,55	176,80
	6000,00	108,72	159,55	174,14
1,3	4000,00	159,75	218,91	214,39
	5000,00	159,75	218,91	221,25
	6000,00	159,75	218,91	205,28
1,4	4000,00	206,72	261,26	279,59
	5000,00	206,72	261,26	256,61
	6000,00	206,72	261,26	234,15
1,5	4000,00	249,08	284,70	297,12
	5000,00	249,08	284,70	277,88
	6000,00	249,08	284,70	230,55

*Fonte: Autor (2025)*

APÊNDICE C: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica I)

**Apêndice C.23:**Seção W310x52,0 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	133,13	61,28	133,13	250,06	78,08
	5000,00	133,13	61,28	133,13	213,04	73,55
	6000,00	133,13	61,28	133,13	207,35	83,51
1,3	4000,00	194,62	105,39	194,62	300,41	127,46
	5000,00	194,62	105,39	194,62	301,68	129,24
	6000,00	194,62	105,39	194,62	276,15	116,31
1,4	4000,00	250,42	145,77	250,42	377,59	172,87
	5000,00	250,42	145,77	250,42	381,79	173,49
	6000,00	250,42	145,77	250,42	347,95	127,43
1,5	4000,00	299,29	179,53	299,29	488,81	223,29
	5000,00	299,29	179,53	299,29	449,64	180,41
	6000,00	299,29	179,53	299,29	380,07	136,84

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.24:**Seção W310x52,0 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	109,20	161,19	197,77
	5000,00	109,20	161,19	168,50
	6000,00	109,20	161,19	163,99
1,3	4000,00	159,62	205,18	217,99
	5000,00	159,62	205,18	218,90
	6000,00	159,62	205,18	200,39
1,4	4000,00	205,53	222,75	252,15
	5000,00	205,53	222,75	254,96
	6000,00	205,53	222,75	232,36
1,5	4000,00	246,11	236,03	300,86
	5000,00	246,11	236,03	276,76
	6000,00	246,11	236,03	233,94

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.25:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	130,75	66,89	130,75	235,80	74,39
	5000,00	130,75	66,89	130,75	228,07	79,05
	6000,00	130,75	66,89	130,75	217,58	90,01
1,3	4000,00	190,20	114,23	190,20	357,23	134,09
	5000,00	190,20	114,23	190,20	293,51	128,41
	6000,00	190,20	114,23	190,20	293,00	125,85
1,4	4000,00	243,12	153,88	243,12	422,01	191,51
	5000,00	243,12	153,88	243,12	413,82	188,65
	6000,00	243,12	153,88	243,12	389,98	141,68
1,5	4000,00	288,20	223,73	288,20	488,27	230,94
	5000,00	288,20	223,73	288,20	476,96	206,60
	6000,00	288,20	223,73	288,20	419,62	150,70

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.26:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	107,62	150,80	173,15
	5000,00	107,62	150,80	167,47
	6000,00	107,62	150,80	159,76
1,3	4000,00	156,86	174,14	240,51
	5000,00	156,86	174,14	197,61
	6000,00	156,86	174,14	197,28
1,4	4000,00	201,12	189,62	261,26
	5000,00	201,12	189,62	256,19
	6000,00	201,12	189,62	241,43
1,5	4000,00	239,48	196,87	278,36
	5000,00	239,48	196,87	271,92
	6000,00	239,48	196,87	239,22

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.27:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	126,13	72,18	126,13	271,61	81,13
	5000,00	126,13	72,18	126,13	210,56	91,81
	6000,00	126,13	72,18	126,13	206,33	85,70
1,3	4000,00	182,83	115,00	182,83	330,98	144,31
	5000,00	182,83	115,00	182,83	323,50	144,86
	6000,00	182,83	115,00	182,83	314,00	139,94
1,4	4000,00	232,59	146,35	232,59	408,73	193,61
	5000,00	232,59	146,35	232,59	410,89	191,05
	6000,00	232,59	146,35	232,59	395,59	171,18
1,5	4000,00	274,17	241,34	274,17	553,11	245,07
	5000,00	274,17	241,34	274,17	503,58	222,51
	6000,00	274,17	241,34	274,17	450,25	173,90

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.28:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	104,85	145,74	186,82
	5000,00	104,85	145,74	144,84
	6000,00	104,85	145,74	141,93
1,3	4000,00	152,47	171,17	208,62
	5000,00	152,47	171,17	203,91
	6000,00	152,47	171,17	197,92
1,4	4000,00	194,82	182,75	236,69
	5000,00	194,82	182,75	237,94
	6000,00	194,82	182,75	229,08
1,5	4000,00	230,95	187,39	294,69
	5000,00	230,95	187,39	268,30
	6000,00	230,95	187,39	239,89

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.29:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	120,63	77,35	120,63	254,06	88,18
	5000,00	120,63	77,35	120,63	240,27	98,81
	6000,00	120,63	77,35	120,63	229,67	98,66
1,3	4000,00	174,23	134,61	174,23	316,97	148,16
	5000,00	174,23	134,61	174,23	316,11	145,07
	6000,00	174,23	134,61	174,23	306,05	137,83
1,4	4000,00	220,94	195,44	220,94	483,29	202,92
	5000,00	220,94	195,44	220,94	453,34	198,98
	6000,00	220,94	195,44	220,94	423,78	184,75
1,5	4000,00	259,52	258,57	259,52	547,17	242,25
	5000,00	259,52	258,57	259,52	514,59	233,33
	6000,00	259,52	258,57	259,52	471,48	196,27

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.30:**Seção W310x52,0 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	101,54	145,92	164,85
	5000,00	101,54	145,92	155,90
	6000,00	101,54	145,92	149,01
1,3	4000,00	147,20	166,75	188,40
	5000,00	147,20	166,75	187,88
	6000,00	147,20	166,75	181,90
1,4	4000,00	187,59	175,27	263,69
	5000,00	187,59	175,27	247,35
	6000,00	187,59	175,27	231,22
1,5	4000,00	221,68	178,03	274,37
	5000,00	221,68	178,03	258,03
	6000,00	221,68	178,03	236,42

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.31:**Seção W360x44,0 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	108,34	55,81	108,34	223,92	64,76
	5000,00	108,34	55,81	108,34	187,39	65,25
	6000,00	108,34	55,81	108,34	180,20	66,85
1,3	4000,00	157,86	91,78	157,86	262,02	105,34
	5000,00	157,86	91,78	157,86	260,27	110,42
	6000,00	157,86	91,78	157,86	235,51	93,75
1,4	4000,00	201,94	123,04	201,94	310,96	132,55
	5000,00	201,94	123,04	201,94	313,16	134,73
	6000,00	201,94	123,04	201,94	311,22	94,16
1,5	4000,00	239,81	147,21	239,81	417,32	185,84
	5000,00	239,81	147,21	239,81	375,59	156,22
	6000,00	239,81	147,21	239,81	334,62	97,71

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.32:**Seção W360x44,0 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	89,04	152,36	189,02
	5000,00	89,04	152,36	158,18
	6000,00	89,04	152,36	152,12
1,3	4000,00	129,95	201,75	203,01
	5000,00	129,95	201,75	201,66
	6000,00	129,95	201,75	182,47
1,4	4000,00	166,69	229,52	221,94
	5000,00	166,69	229,52	223,50
	6000,00	166,69	229,52	222,13
1,5	4000,00	198,74	236,85	274,88
	5000,00	198,74	236,85	247,38
	6000,00	198,74	236,85	220,40

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE C: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica I)

**Apêndice C.33:**Seção W360x44,0 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	104,05	60,51	104,05	206,35	59,14
	5000,00	104,05	60,51	104,05	198,23	71,70
	6000,00	104,05	60,51	104,05	188,06	72,26
1,3	4000,00	150,61	91,21	150,61	303,58	104,02
	5000,00	150,61	91,21	150,61	247,86	108,13
	6000,00	150,61	91,21	150,61	244,67	104,14
1,4	4000,00	191,60	115,66	191,60	338,20	143,63
	5000,00	191,60	115,66	191,60	330,73	145,39
	6000,00	191,60	115,66	191,60	323,16	129,25
1,5	4000,00	225,94	139,00	225,94	409,38	190,36
	5000,00	225,94	139,00	225,94	401,03	177,61
	6000,00	225,94	139,00	225,94	365,45	121,22

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.34:**Seção W360x44,0 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	86,50	147,35	160,09
	5000,00	86,50	147,35	153,79
	6000,00	86,50	147,35	145,91
1,3	4000,00	125,61	174,92	216,12
	5000,00	125,61	174,92	176,44
	6000,00	125,61	174,92	174,17
1,4	4000,00	160,51	177,43	221,55
	5000,00	160,51	177,43	216,66
	6000,00	160,51	177,43	211,70
1,5	4000,00	190,35	181,10	247,24
	5000,00	190,35	181,10	242,20
	6000,00	190,35	181,10	220,71

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.35:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	98,30	63,68	98,30	236,22	68,43
	5000,00	98,30	63,68	98,30	212,67	66,33
	6000,00	98,30	63,68	98,30	173,70	70,00
1,3	4000,00	141,96	93,23	141,96	277,79	116,38
	5000,00	141,96	93,23	141,96	270,60	117,99
	6000,00	141,96	93,23	141,96	258,46	115,34
1,4	4000,00	179,84	118,44	179,84	329,68	152,82
	5000,00	179,84	118,44	179,84	327,00	152,25
	6000,00	179,84	118,44	179,84	318,99	145,37
1,5	4000,00	211,15	225,55	211,15	468,51	196,47
	5000,00	211,15	225,55	211,15	431,00	183,99
	6000,00	211,15	225,55	211,15	393,95	140,58

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.36:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	82,99	128,18	170,35
	5000,00	82,99	128,18	153,37
	6000,00	82,99	128,18	125,26
1,3	4000,00	120,29	136,50	183,69
	5000,00	120,29	136,50	178,94
	6000,00	120,29	136,50	170,90
1,4	4000,00	153,16	143,02	200,47
	5000,00	153,16	143,02	198,84
	6000,00	153,16	143,02	193,97
1,5	4000,00	180,92	145,01	262,36
	5000,00	180,92	145,01	241,35
	6000,00	180,92	145,01	220,61

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.37:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	92,34	64,06	92,34	217,37	68,50
	5000,00	92,34	64,06	92,34	203,07	77,01
	6000,00	92,34	64,06	92,34	188,82	78,50
1,3	4000,00	133,17	88,35	133,17	263,84	122,55
	5000,00	133,17	88,35	133,17	254,85	117,03
	6000,00	133,17	88,35	133,17	246,66	110,82
1,4	4000,00	168,25	112,65	168,25	377,58	160,68
	5000,00	168,25	112,65	168,25	354,51	160,31
	6000,00	168,25	112,65	168,25	336,43	155,58
1,5	4000,00	197,00	243,39	197,00	457,26	202,02
	5000,00	197,00	243,39	197,00	430,93	196,08
	6000,00	197,00	243,39	197,00	398,01	167,65

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.38:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	79,16	118,41	147,00
	5000,00	79,16	118,41	137,34
	6000,00	79,16	118,41	127,70
1,3	4000,00	114,61	131,08	163,50
	5000,00	114,61	131,08	157,93
	6000,00	114,61	131,08	152,85
1,4	4000,00	145,52	135,42	215,00
	5000,00	145,52	135,42	201,87
	6000,00	145,52	135,42	191,57
1,5	4000,00	171,40	136,18	239,54
	5000,00	171,40	136,18	225,76
	6000,00	171,40	136,18	208,51

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.39:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	86,73	66,15	86,73	202,70	62,50
	5000,00	86,73	66,15	86,73	230,98	64,84
	6000,00	86,73	66,15	86,73	206,76	81,91
1,3	4000,00	124,78	135,71	124,78	313,68	111,94
	5000,00	124,78	135,71	124,78	287,77	126,59
	6000,00	124,78	135,71	124,78	268,17	119,32
1,4	4000,00	157,47	197,03	157,47	368,04	164,87
	5000,00	157,47	197,03	157,47	348,19	162,06
	6000,00	157,47	197,03	157,47	328,66	155,57
1,5	4000,00	184,03	260,67	184,03	435,22	203,14
	5000,00	184,03	260,67	184,03	407,81	196,48
	6000,00	184,03	260,67	184,03	420,94	168,12

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.40:**Seção W360x44,0 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	75,41	115,68	129,45
	5000,00	75,41	115,68	147,51
	6000,00	75,41	115,68	132,04
1,3	4000,00	108,88	125,35	183,51
	5000,00	108,88	125,35	168,35
	6000,00	108,88	125,35	156,89
1,4	4000,00	138,06	128,14	197,67
	5000,00	138,06	128,14	187,01
	6000,00	138,06	128,14	176,51
1,5	4000,00	162,25	128,08	214,82
	5000,00	162,25	128,08	201,30
	6000,00	162,25	128,08	207,78

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.41:**Seção W360x51,0 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	118,80	58,76	118,80	236,74	73,67
	5000,00	118,80	58,76	118,80	199,37	64,96
	6000,00	118,80	58,76	118,80	193,28	73,99
1,3	4000,00	173,31	98,65	173,31	277,17	111,96
	5000,00	173,31	98,65	173,31	275,49	114,78
	6000,00	173,31	98,65	173,31	252,89	102,62
1,4	4000,00	222,30	135,35	222,30	328,30	133,58
	5000,00	222,30	135,35	222,30	333,06	140,80
	6000,00	222,30	135,35	222,30	331,26	131,80
1,5	4000,00	264,55	161,99	264,55	439,76	199,26
	5000,00	264,55	161,99	264,55	404,15	182,21
	6000,00	264,55	161,99	264,55	371,67	125,52

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.42:**Seção W360x51,0 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	97,49	162,06	199,72
	5000,00	97,49	162,06	168,19
	6000,00	97,49	162,06	163,06
1,3	4000,00	142,36	216,04	214,62
	5000,00	142,36	216,04	213,33
	6000,00	142,36	216,04	195,83
1,4	4000,00	182,95	248,14	234,12
	5000,00	182,95	248,14	237,51
	6000,00	182,95	248,14	236,23
1,5	4000,00	218,43	258,55	289,42
	5000,00	218,43	258,55	265,98
	6000,00	218,43	258,55	244,60

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.43:**Seção W360x51,0 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	114,89	64,74	114,89	222,37	65,48
	5000,00	114,89	64,74	114,89	211,49	78,91
	6000,00	114,89	64,74	114,89	201,98	78,21
1,3	4000,00	166,76	99,60	166,76	309,85	121,33
	5000,00	166,76	99,60	166,76	265,08	114,40
	6000,00	166,76	99,60	166,76	264,13	113,31
1,4	4000,00	212,34	127,50	212,34	378,16	166,20
	5000,00	212,34	127,50	212,34	354,84	157,04
	6000,00	212,34	127,50	212,34	346,80	154,80
1,5	4000,00	250,75	152,94	250,75	423,14	195,06
	5000,00	250,75	152,94	250,75	433,54	201,80
	6000,00	250,75	152,94	250,75	403,91	149,71

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.44:**Seção W360x51,0 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	95,12	158,00	172,40
	5000,00	95,12	158,00	163,95
	6000,00	95,12	158,00	156,59
1,3	4000,00	138,46	190,17	220,33
	5000,00	138,46	190,17	188,50
	6000,00	138,46	190,17	187,82
1,4	4000,00	177,02	195,07	247,48
	5000,00	177,02	195,07	232,21
	6000,00	177,02	195,07	226,96
1,5	4000,00	210,15	200,22	255,23
	5000,00	210,15	200,22	261,50
	6000,00	210,15	200,22	243,63

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.45:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	109,17	68,37	109,17	261,95	74,19
	5000,00	109,17	68,37	109,17	230,36	63,50
	6000,00	109,17	68,37	109,17	186,94	76,18
1,3	4000,00	157,81	102,87	157,81	307,26	122,88
	5000,00	157,81	102,87	157,81	289,40	127,84
	6000,00	157,81	102,87	157,81	279,50	124,95
1,4	4000,00	200,15	130,47	200,15	364,63	173,13
	5000,00	200,15	130,47	200,15	351,42	165,20
	6000,00	200,15	130,47	200,15	344,13	160,08
1,5	4000,00	235,28	237,37	235,28	495,35	219,37
	5000,00	235,28	237,37	235,28	465,56	213,04
	6000,00	235,28	237,37	235,28	430,03	175,96

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.46:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	91,68	139,40	188,71
	5000,00	91,68	139,40	165,95
	6000,00	91,68	139,40	134,68
1,3	4000,00	133,01	150,44	202,96
	5000,00	133,01	150,44	191,15
	6000,00	133,01	150,44	184,62
1,4	4000,00	169,52	158,52	221,44
	5000,00	169,52	158,52	213,43
	6000,00	169,52	158,52	209,00
1,5	4000,00	200,49	161,27	277,00
	5000,00	200,49	161,27	260,35
	6000,00	200,49	161,27	240,48

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.47:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	102,95	69,45	102,95	238,96	73,89
	5000,00	102,95	69,45	102,95	218,00	86,81
	6000,00	102,95	69,45	102,95	203,98	87,74
1,3	4000,00	148,52	97,49	148,52	287,95	130,93
	5000,00	148,52	97,49	148,52	275,84	126,28
	6000,00	148,52	97,49	148,52	268,85	120,71
1,4	4000,00	187,76	124,08	187,76	428,47	178,09
	5000,00	187,76	124,08	187,76	382,13	176,22
	6000,00	187,76	124,08	187,76	363,33	172,14
1,5	4000,00	220,08	256,22	220,08	487,51	222,78
	5000,00	220,08	256,22	220,08	466,34	218,96
	6000,00	220,08	256,22	220,08	436,70	198,89

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.48:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	87,77	129,79	161,38
	5000,00	87,77	129,79	147,23
	6000,00	87,77	129,79	137,76
1,3	4000,00	127,11	144,97	178,20
	5000,00	127,11	144,97	170,71
	6000,00	127,11	144,97	166,38
1,4	4000,00	161,50	150,48	243,64
	5000,00	161,50	150,48	217,29
	6000,00	161,50	150,48	206,60
1,5	4000,00	190,46	151,74	254,95
	5000,00	190,46	151,74	243,88
	6000,00	190,46	151,74	228,38

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.49:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	96,85	73,05	96,85	301,59	74,26
	5000,00	96,85	73,05	96,85	245,59	69,08
	6000,00	96,85	73,05	96,85	222,61	91,17
1,3	4000,00	139,45	142,85	139,45	354,80	131,39
	5000,00	139,45	142,85	139,45	308,69	138,88
	6000,00	139,45	142,85	139,45	290,97	134,54
1,4	4000,00	176,03	207,28	176,03	414,16	181,55
	5000,00	176,03	207,28	176,03	376,75	178,32
	6000,00	176,03	207,28	176,03	356,14	171,06
1,5	4000,00	205,89	274,32	205,89	468,98	222,52
	5000,00	205,89	274,32	205,89	432,94	215,46
	6000,00	205,89	274,32	205,89	458,72	201,00

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.50:**Seção W360x51,0 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	83,74	127,27	192,32
	5000,00	83,74	127,27	156,61
	6000,00	83,74	127,27	141,96
1,3	4000,00	121,03	139,00	207,24
	5000,00	121,03	139,00	180,31
	6000,00	121,03	139,00	169,95
1,4	4000,00	153,53	142,65	222,09
	5000,00	153,53	142,65	202,02
	6000,00	153,53	142,65	190,98
1,5	4000,00	180,61	142,91	231,06
	5000,00	180,61	142,91	213,32
	6000,00	180,61	142,91	226,01

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.51:**Seção W360x57,8 Do/d = 0,8, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	143,83	65,05	143,83	268,01	87,00
	5000,00	143,83	65,05	143,83	231,35	75,99
	6000,00	143,83	65,05	143,83	221,95	80,73
1,3	4000,00	210,66	112,86	210,66	334,54	134,33
	5000,00	210,66	112,86	210,66	329,89	136,08
	6000,00	210,66	112,86	210,66	293,33	123,15
1,4	4000,00	271,95	158,56	271,95	394,60	180,91
	5000,00	271,95	158,56	271,95	395,79	180,26
	6000,00	271,95	158,56	271,95	383,56	141,15
1,5	4000,00	325,73	200,19	325,73	508,63	238,50
	5000,00	325,73	200,19	325,73	468,90	207,25
	6000,00	325,73	200,19	325,73	413,96	148,53

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.52:**Seção W360x57,8 Do/d = 0,8, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	118,08	183,63	225,65
	5000,00	118,08	183,63	194,78
	6000,00	118,08	183,63	186,86
1,3	4000,00	172,82	248,53	258,56
	5000,00	172,82	248,53	254,97
	6000,00	172,82	248,53	226,70
1,4	4000,00	223,04	291,61	280,81
	5000,00	223,04	291,61	281,65
	6000,00	223,04	291,61	272,94
1,5	4000,00	267,37	310,98	334,04
	5000,00	267,37	310,98	307,94
	6000,00	267,37	310,98	271,86

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.53:**Seção W360x57,8 Do/d = 0,9, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	142,00	71,81	142,00	250,32	83,72
	5000,00	142,00	71,81	142,00	241,85	83,84
	6000,00	142,00	71,81	142,00	230,62	93,83
1,3	4000,00	207,01	118,10	207,01	374,75	140,61
	5000,00	207,01	118,10	207,01	307,46	134,47
	6000,00	207,01	118,10	207,01	306,80	130,88
1,4	4000,00	264,89	158,24	264,89	441,64	200,53
	5000,00	264,89	158,24	264,89	429,90	199,98
	6000,00	264,89	158,24	264,89	414,65	174,89
1,5	4000,00	314,44	189,03	314,44	513,12	247,24
	5000,00	314,44	189,03	314,44	508,34	235,79
	6000,00	314,44	189,03	314,44	457,51	175,44

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.54:**Seção W360x57,8 Do/d = 0,9, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	116,71	182,36	193,71
	5000,00	116,71	182,36	187,15
	6000,00	116,71	182,36	178,46
1,3	4000,00	170,40	226,35	265,97
	5000,00	170,40	226,35	218,21
	6000,00	170,40	226,35	217,74
1,4	4000,00	218,63	238,94	288,43
	5000,00	218,63	238,94	280,76
	6000,00	218,63	238,94	270,80
1,5	4000,00	260,57	249,03	308,90
	5000,00	260,57	249,03	306,02
	6000,00	260,57	249,03	275,43

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.55:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,0, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	137,11	78,52	137,11	302,28	88,11
	5000,00	137,11	78,52	137,11	273,74	90,36
	6000,00	137,11	78,52	137,11	217,89	90,18
1,3	4000,00	198,76	126,19	198,76	339,74	148,55
	5000,00	198,76	126,19	198,76	335,85	151,96
	6000,00	198,76	126,19	198,76	325,56	148,05
1,4	4000,00	252,94	161,64	252,94	426,25	205,96
	5000,00	252,94	161,64	252,94	421,33	200,72
	6000,00	252,94	161,64	252,94	412,26	191,26
1,5	4000,00	298,43	262,64	298,43	560,76	260,66
	5000,00	298,43	262,64	298,43	534,08	248,64
	6000,00	298,43	262,64	298,43	481,97	207,33

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.56:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,0, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	113,80	166,14	217,33
	5000,00	113,80	166,14	196,82
	6000,00	113,80	166,14	156,67
1,3	4000,00	165,47	185,50	223,96
	5000,00	165,47	185,50	221,39
	6000,00	165,47	185,50	214,62
1,4	4000,00	211,49	198,52	258,34
	5000,00	211,49	198,52	255,37
	6000,00	211,49	198,52	249,87
1,5	4000,00	250,91	203,88	312,92
	5000,00	250,91	203,88	298,04
	6000,00	250,91	203,88	268,96

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.57:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,1, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	130,68	81,44	130,68	265,74	88,97
	5000,00	130,68	81,44	130,68	249,72	102,31
	6000,00	130,68	81,44	130,68	239,11	103,95
1,3	4000,00	188,70	121,24	188,70	331,25	158,07
	5000,00	188,70	121,24	188,70	363,00	162,12
	6000,00	188,70	121,24	188,70	345,43	159,67
1,4	4000,00	239,28	153,71	239,28	489,29	218,87
	5000,00	239,28	153,71	239,28	464,58	216,76
	6000,00	239,28	153,71	239,28	439,08	207,62
1,5	4000,00	281,19	283,42	281,19	556,25	262,91
	5000,00	281,19	283,42	281,19	540,76	258,63
	6000,00	281,19	283,42	281,19	501,81	228,50

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.58:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,1, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	109,93	157,72	179,11
	5000,00	109,93	157,72	168,30
	6000,00	109,93	157,72	161,15
1,3	4000,00	159,32	180,43	204,63
	5000,00	159,32	180,43	224,24
	6000,00	159,32	180,43	213,38
1,4	4000,00	203,02	189,78	277,66
	5000,00	203,02	189,78	263,64
	6000,00	203,02	189,78	249,17
1,5	4000,00	240,03	192,85	290,32
	5000,00	240,03	192,85	282,23
	6000,00	240,03	192,85	261,90

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice C.59:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,2, comparação cortante horizontal (Vh)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>
1,2	4000,00	123,69	86,66	123,69	309,61	106,40
	5000,00	123,69	86,66	123,69	276,08	110,73
	6000,00	123,69	86,66	123,69	257,81	110,93
1,3	4000,00	178,43	158,09	178,43	383,81	168,23
	5000,00	178,43	158,09	178,43	360,19	166,45
	6000,00	178,43	158,09	178,43	341,76	162,18
1,4	4000,00	225,57	229,29	225,57	478,09	221,15
	5000,00	225,57	229,29	225,57	456,01	217,36
	6000,00	225,57	229,29	225,57	423,50	208,06
1,5	4000,00	264,40	303,54	264,40	536,82	263,84
	5000,00	264,40	303,54	264,40	517,12	258,65
	6000,00	264,40	303,54	264,40	534,29	230,26

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice C.60:**Seção W360x57,8 Do/d = 1,2, comparação cortante vertical (Vv)

<b>P/Do</b>	<b>L [mm]</b>	<b>SCI 355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,FE [kN]</b>
1,2	4000,00	105,50	156,17	197,06
	5000,00	105,50	156,17	175,72
	6000,00	105,50	156,17	164,09
1,3	4000,00	152,78	174,32	223,72
	5000,00	152,78	174,32	209,95
	6000,00	152,78	174,32	199,21
1,4	4000,00	194,11	180,87	255,86
	5000,00	194,11	180,87	244,05
	6000,00	194,11	180,87	226,64
1,5	4000,00	228,90	182,36	263,93
	5000,00	228,90	182,36	254,25
	6000,00	228,90	182,36	262,69

Fonte: Autor (2025)

**APÊNDICE D: Modos de falha e carga crítica**

**Apêndice D.1: Modos de falha e carga crítica – C25**

Concreto	Aço	Enrijecedor	$t_w$ [mm]	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
C25	S550	2S	6,4	438,923	FMA
			7,4	530,175	FMA
			8,6	646,632	FMA
		4S	6,4	595,044	FMA
			7,4	682,741	FMA
			8,6	763,253	FMA
	S690	2S	6,4	500,64	FMA
			7,4	606,698	FMA
			8,6	743,408	FMA
		4S	6,4	653,228	FMA
			7,4	777,191	FMA
			8,6	884,814	FMA
	S890	2S	6,4	537,737	FMA
			7,4	654,417	FMA
			8,6	804,788	FMA
		4S	6,4	703,458	FMA
			7,4	909,849	FMA
			8,6	1076,432	FMA
	S960	2S	6,4	557,284	FMA
			7,4	680,279	FMA
			8,6	837,514	FMA
		4S	6,4	728,447	FMA
			7,4	959,326	FMA
			8,6	1140,537	FMA
S1100	2S	6,4	591,985	FMA	
		7,4	724,703	FMA	
		8,6	897,259	FMA	
	4S	6,4	791,28	FMA	
		7,4	944,991	FMA	
		8,6	1142,539	FMA	

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice D.2:** Modos de falha e carga crítica – C45

Concreto	Aço	Enrijecedor	$t_w$ [mm]	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
C45	S550	2S	6,4	465,037	FMA
			7,4	559,179	FMA
			8,6	680,849	FMA
		4S	6,4	601,348	FMA
			7,4	686,717	FMA
			8,6	772,894	FMA
	S690	2S	6,4	536,123	FMA
			7,4	647,149	FMA
			8,6	791,661	FMA
		4S	6,4	711,99	FMA
			7,4	838,985	FMA
			8,6	964,087	FMA
	S890	2S	6,4	578,194	FMA
			7,4	701,299	FMA
			8,6	857,82	FMA
		4S	6,4	776,203	FMA
			7,4	918,229	FMA
			8,6	1077,191	FMA
	S960	2S	6,4	603,25	FMA
			7,4	733,619	FMA
			8,6	897,656	FMA
		4S	6,4	816,266	FMA
			7,4	964,45	FMA
			8,6	1140,867	FMA
S1100	2S	6,4	632,596	FMA	
		7,4	770,917	FMA	
		8,6	946,044	FMA	
	4S	6,4	865,18	FMA	
		7,4	1021,09	FMA	
		8,6	1216,298	FMA	

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice D.3:** Modos de falha e carga crítica – C65

Concreto	Aço	Enrijecedor	$t_w$ [mm]	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
C65	S550	2S	6,4	474,553	FMA
			7,4	569,95	FMA
			8,6	692,817	FMA
		4S	6,4	619,971	FMA
			7,4	707,856	FMA
			8,6	785,629	FMA
	S690	2S	6,4	544,999	FMA
			7,4	658,2	FMA
			8,6	805,345	FMA
		4S	6,4	727,312	FMA
			7,4	855,779	FMA
			8,6	976,019	FMA
	S890	2S	6,4	586,754	FMA
			7,4	712,574	FMA
			8,6	873,21	FMA
		4S	6,4	793,661	FMA
			7,4	935,549	FMA
			8,6	1091,29	FMA
	S960	2S	6,4	611,73	FMA
			7,4	744,365	FMA
			8,6	912,586	FMA
		4S	6,4	799,079	FMA
			7,4	980,156	FMA
			8,6	1097,303	FMA
S1100	2S	6,4	640,772	FMA	
		7,4	781,033	FMA	
		8,6	958,451	FMA	
	4S	6,4	880,804	FMA	
		7,4	1036,735	FMA	
		8,6	1448,837	FMA	

Fonte: Autor (2025)

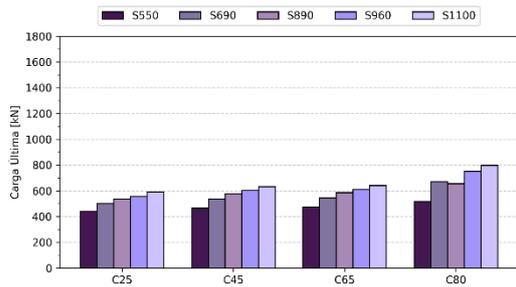
**Apêndice D.4:** Modos de falha e carga crítica – C80

Concreto	Aço	Enrijecedor	$t_w$ [mm]	Carga Crítica [kN]	Modo de Falha
C80	S550	2S	6,4	517,146	FMA
			7,4	555,855	FMA
			8,6	677,854	FMA
		4S	6,4	742,765	FMA
			7,4	695,206	FMA
			8,6	1006,311	FMA
	S690	2S	6,4	670,203	FMA
			7,4	698,658	FMA
			8,6	970,323	FMA
		4S	6,4	904,256	FMA
			7,4	918,755	FMA
			8,6	1251,094	FMA
	S890	2S	6,4	654,979	FMA
			7,4	852,938	FMA
			8,6	957,109	FMA
		4S	6,4	894,112	FMA
			7,4	1064,179	FMA
			8,6	1247,638	FMA
	S960	2S	6,4	750,708	FMA
			7,4	897,732	FMA
			8,6	1079,009	FMA
		4S	6,4	1026,296	FMA
			7,4	1214,045	FMA
			8,6	1436,567	FMA
S1100	2S	6,4	797,164	FMA	
		7,4	950,475	FMA	
		8,6	1144,869	FMA	
	4S	6,4	1145,34	FMA	
		7,4	1332,088	FMA	
		8,6	1557,807	FMA	

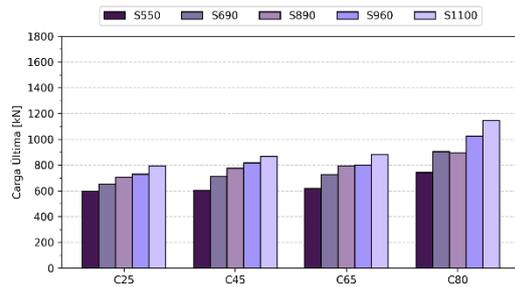
Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE E: Gráficos da carga crítica (Paramétrica II)

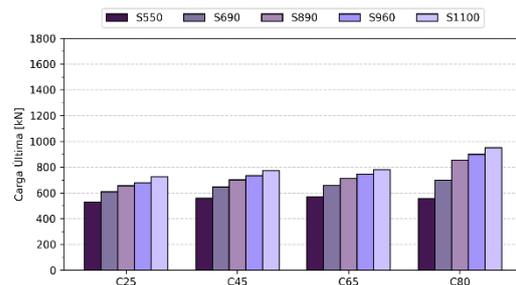
Apêndice E.1: Carga Crítica na influência dos parâmetros



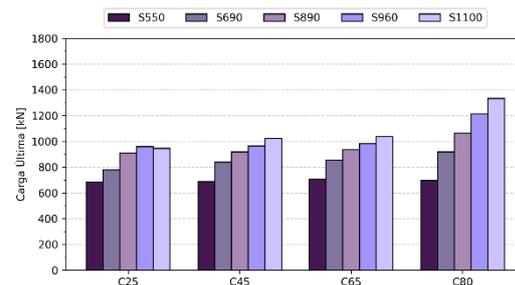
Enrijecedores = 2S /  $t_w = 6,4\text{mm}$



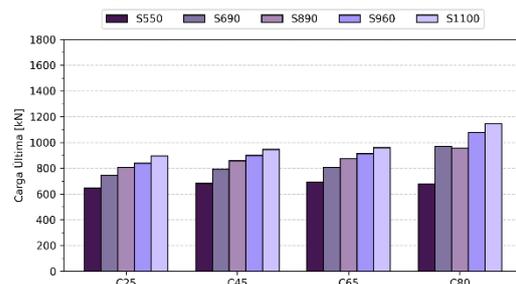
Enrijecedores = 4S /  $t_w = 6,4\text{mm}$



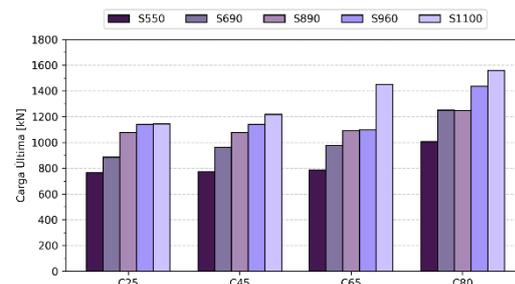
Enrijecedores = 2S /  $t_w = 7,4\text{mm}$



Enrijecedores = 4S /  $t_w = 7,4\text{mm}$



Enrijecedores = 2S /  $t_w = 8,6\text{mm}$



Enrijecedores = 4S /  $t_w = 8,6\text{mm}$

**APÊNDICE F: Comparação entre numérico e analítico (Paramétrica II)**

**Apêndice F.1: C25 / Enrijecedor = 2S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )**

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	155.80	114.75
	7.4	174.78	115.94	174.78	188.62	160.88
	8.6	261.17	166.04	261.17	230.62	219.06
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	211.21	149.81
	7.4	181.88	125.55	181.88	242.90	178.89
	8.6	275.05	179.81	275.05	272.22	207.01
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	165.07	113.27
	7.4	187.91	136.70	187.91	198.94	159.39
	8.6	286.82	195.77	286.82	242.83	219.02
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	213.44	150.21
	7.4	190.94	140.97	190.94	244.32	180.66
	8.6	292.00	201.89	292.00	275.66	216.26
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	168.43	113.49
	7.4	193.29	147.25	193.29	202.76	159.72
	8.6	296.58	210.88	296.58	247.10	220.12

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice F.2: C25 / Enrijecedor = 2S – Cortante Vertical ( $V_v$ )**

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>SCI P355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,Fe [kN]</b>
S550	6.4	103.26	124.60	219.46
	7.4	151.11	180.15	265.09
	8.6	220.40	258.33	323.32
S690	6.4	108.28	131.55	297.52
	7.4	159.87	192.35	341.37
	8.6	236.11	280.20	381.63
S890	6.4	112.93	138.03	232.52
	7.4	168.06	203.89	279.59
	8.6	251.02	301.34	340.42
S960	6.4	115.04	140.80	300.67
	7.4	171.50	208.45	343.36
	8.6	256.81	309.08	386.45
S1100	6.4	117.04	143.61	237.28
	7.4	175.06	213.51	284.98
	8.6	263.37	318.49	346.41

*Fonte: Autor (2025)*

**Apêndice F.3:** C25 / Enrijecedor = 4S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	220.06	151.44
	7.4	174.78	115.94	174.78	251.83	180.36
	8.6	261.17	166.04	261.17	280.20	217.45
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	183.55	106.90
	7.4	181.88	125.55	181.88	197.75	159.74
	8.6	275.05	179.81	275.05	241.76	217.90
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	263.64	152.55
	7.4	187.91	136.70	187.91	247.34	177.21
	8.6	286.82	195.77	286.82	358.90	202.28
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	177.70	136.38
	7.4	190.94	140.97	190.94	215.84	186.45
	8.6	292.00	201.89	292.00	265.14	258.19
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	231.85	183.11
	7.4	193.29	147.25	193.29	276.49	230.26
	8.6	296.58	210.88	296.58	315.58	287.58

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.4:** C25 / Enrijecedor = 4S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>SCI P355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,Fe [kN]</b>
S550	6.4	103.26	124.60	309.99
	7.4	151.11	180.15	353.93
	8.6	220.40	258.33	392.81
S690	6.4	108.28	131.55	258.57
	7.4	159.87	192.35	277.93
	8.6	236.11	280.20	338.93
S890	6.4	112.93	138.03	371.38
	7.4	168.06	203.89	347.60
	8.6	251.02	301.34	503.16
S960	6.4	115.04	140.80	250.32
	7.4	171.50	208.45	303.35
	8.6	256.81	309.08	371.70
S1100	6.4	117.04	143.61	326.61
	7.4	175.06	213.51	388.60
	8.6	263.37	318.49	442.41

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.5:** C45 / Enrijecedor = 2S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	190.30	134.41
	7.4	174.78	115.94	174.78	230.23	184.46
	8.6	261.17	166.04	261.17	282.35	256.44
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	252.71	185.16
	7.4	181.88	125.55	181.88	298.48	232.67
	8.6	275.05	179.81	275.05	343.85	277.90
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	193.45	132.89
	7.4	187.91	136.70	187.91	234.17	183.27
	8.6	286.82	195.77	286.82	287.23	255.65
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	258.15	185.77
	7.4	190.94	140.97	190.94	304.46	232.58
	8.6	292.00	201.89	292.00	348.10	277.89
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	237.89	113.54
	7.4	193.29	147.25	193.29	248.56	182.07
	8.6	296.58	210.88	296.58	346.08	238.23

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.6:** C45 / Enrijecedor = 2S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>SCI P355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,Fe [kN]</b>
S550	6.4	103.26	124.60	268.06
	7.4	151.11	180.15	323.57
	8.6	220.40	258.33	395.83
S690	6.4	108.28	131.55	356.00
	7.4	159.87	192.35	419.49
	8.6	236.11	280.20	482.04
S890	6.4	112.93	138.03	272.50
	7.4	168.06	203.89	329.10
	8.6	251.02	301.34	402.67
S960	6.4	115.04	140.80	363.66
	7.4	171.50	208.45	427.89
	8.6	256.81	309.08	488.01
S1100	6.4	117.04	143.61	335.10
	7.4	175.06	213.51	349.33
	8.6	263.37	318.49	485.16

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.7:** C45 / Enrijecedor = 4S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	320.96	185.88
	7.4	174.78	115.94	174.78	326.87	233.30
	8.6	261.17	166.04	261.17	446.22	272.02
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	190.86	148.71
	7.4	181.88	125.55	181.88	232.82	201.14
	8.6	275.05	179.81	275.05	287.03	275.11
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	249.69	204.78
	7.4	187.91	136.70	187.91	323.70	258.36
	8.6	286.82	195.77	286.82	383.91	320.31
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	205.23	146.12
	7.4	190.94	140.97	190.94	249.50	199.89
	8.6	292.00	201.89	292.00	305.95	276.92
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	275.51	207.16
	7.4	193.29	147.25	193.29	326.67	260.65
	8.6	296.58	210.88	296.58	384.18	321.55

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.8:** C45 / Enrijecedor = 4S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>SCI P355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,Fe [kN]</b>
S550	6.4	103.26	124.60	452.13
	7.4	151.11	180.15	459.38
	8.6	220.40	258.33	625.55
S690	6.4	108.28	131.55	268.87
	7.4	159.87	192.35	327.21
	8.6	236.11	280.20	402.39
S890	6.4	112.93	138.03	351.73
	7.4	168.06	203.89	454.92
	8.6	251.02	301.34	538.22
S960	6.4	115.04	140.80	289.10
	7.4	171.50	208.45	350.65
	8.6	256.81	309.08	428.91
S1100	6.4	117.04	143.61	388.10
	7.4	175.06	213.51	459.11
	8.6	263.37	318.49	538.60

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.9:** C65 / Enrijecedor = 2S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>Ward [kN]</b>	<b>Grilo [kN]</b>	<b>Eurocode [kN]</b>	<b>SD31 [kN]</b>	<b>SOF3 [kN]</b>
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	208.27	144.61
	7.4	174.78	115.94	174.78	253.51	198.70
	8.6	261.17	166.04	261.17	311.44	276.14
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	281.70	208.33
	7.4	181.88	125.55	181.88	332.84	261.87
	8.6	275.05	179.81	275.05	389.22	323.70
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	232.48	141.35
	7.4	187.91	136.70	187.91	303.45	187.21
	8.6	286.82	195.77	286.82	341.36	260.86
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	317.36	210.39
	7.4	190.94	140.97	190.94	378.60	262.31
	8.6	292.00	201.89	292.00	444.99	311.06
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	197.81	155.02
	7.4	193.29	147.25	193.29	242.03	209.96
	8.6	296.58	210.88	296.58	298.71	290.29

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.10:** C65 / Enrijecedor = 2S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

<b>Classe Aço</b>	<b><math>t_w</math> [mm]</b>	<b>SCI P355 [kN]</b>	<b>Panedpojaman [kN]</b>	<b>Vglobal,Fe [kN]</b>
S550	6.4	103.26	124.60	293.38
	7.4	151.11	180.15	356.29
	8.6	220.40	258.33	436.61
S690	6.4	108.28	131.55	396.83
	7.4	159.87	192.35	467.77
	8.6	236.11	280.20	545.65
S890	6.4	112.93	138.03	327.49
	7.4	168.06	203.89	426.47
	8.6	251.02	301.34	478.55
S960	6.4	115.04	140.80	447.06
	7.4	171.50	208.45	532.09
	8.6	256.81	309.08	623.82
S1100	6.4	117.04	143.61	278.64
	7.4	175.06	213.51	340.14
	8.6	263.37	318.49	418.76

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.11:** C65 / Enrijecedor = 4S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	Ward [kN]	Grilo [kN]	Eurocode [kN]	SD31 [kN]	SOF3 [kN]
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	258.56	216.54
	7.4	174.78	115.94	174.78	341.30	274.62
	8.6	261.17	166.04	261.17	406.78	342.71
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	214.12	152.39
	7.4	181.88	125.55	181.88	261.00	209.15
	8.6	275.05	179.81	275.05	320.16	288.12
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	289.73	219.84
	7.4	187.91	136.70	187.91	343.12	275.37
	8.6	286.82	195.77	286.82	406.90	344.23
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	217.13	150.86
	7.4	190.94	140.97	190.94	264.83	207.93
	8.6	292.00	201.89	292.00	325.48	287.34
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	283.64	218.09
	7.4	193.29	147.25	193.29	348.72	276.60
	8.6	296.58	210.88	296.58	391.36	347.17

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.12:** C65 / Enrijecedor = 4S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	SCI P355 [kN]	Panedpojaman [kN]	Vglobal,Fe [kN]
S550	6.4	103.26	124.60	364.22
	7.4	151.11	180.15	479.66
	8.6	220.40	258.33	570.27
S690	6.4	108.28	131.55	301.63
	7.4	159.87	192.35	366.81
	8.6	236.11	280.20	448.83
S890	6.4	112.93	138.03	408.13
	7.4	168.06	203.89	482.23
	8.6	251.02	301.34	570.43
S960	6.4	115.04	140.80	305.87
	7.4	171.50	208.45	372.18
	8.6	256.81	309.08	456.29
S1100	6.4	117.04	143.61	399.54
	7.4	175.06	213.51	490.08
	8.6	263.37	318.49	548.65

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.13:** C80 / Enrijecedor = 2S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	Ward [kN]	Grilo [kN]	Eurocode [kN]	SD31 [kN]	SOF3 [kN]
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	266.46	138.26
	7.4	174.78	115.94	174.78	319.39	194.55
	8.6	261.17	166.04	261.17	384.84	268.68
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	364.28	221.44
	7.4	181.88	125.55	181.88	431.93	278.31
	8.6	275.05	179.81	275.05	512.37	335.64
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	210.12	161.82
	7.4	187.91	136.70	187.91	257.82	219.95
	8.6	286.82	195.77	286.82	320.01	295.21
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	280.87	233.07
	7.4	190.94	140.97	190.94	336.19	291.16
	8.6	292.00	201.89	292.00	407.50	369.87
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	224.54	159.56
	7.4	193.29	147.25	193.29	274.27	219.48
	8.6	296.58	210.88	296.58	337.42	298.46

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.14:** C80 / Enrijecedor = 2S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	SCI P355 [kN]	Panedpojaman [kN]	Vglobal,Fe [kN]
S550	6.4	103.26	124.60	375.35
	7.4	151.11	180.15	448.87
	8.6	220.40	258.33	539.50
S690	6.4	108.28	131.55	513.15
	7.4	159.87	192.35	607.02
	8.6	236.11	280.20	718.28
S890	6.4	112.93	138.03	295.99
	7.4	168.06	203.89	362.35
	8.6	251.02	301.34	448.63
S960	6.4	115.04	140.80	395.64
	7.4	171.50	208.45	472.50
	8.6	256.81	309.08	571.27
S1100	6.4	117.04	143.61	316.30
	7.4	175.06	213.51	385.46
	8.6	263.37	318.49	473.02

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.15:** C80 / Enrijecedor = 4S – Cortante Horizontal ( $V_h$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	Ward [kN]	Grilo [kN]	Eurocode [kN]	SD31 [kN]	SOF3 [kN]
S550	6.4	116.80	81.95	116.80	307.09	237.31
	7.4	174.78	115.94	174.78	363.28	295.72
	8.6	261.17	166.04	261.17	433.80	372.05
S690	6.4	120.71	88.74	120.71	227.44	158.07
	7.4	181.88	125.55	181.88	277.86	218.33
	8.6	275.05	179.81	275.05	341.84	300.25
S890	6.4	124.02	96.62	124.02	312.64	238.43
	7.4	187.91	136.70	187.91	368.84	297.10
	8.6	286.82	195.77	286.82	516.75	365.97
S960	6.4	125.87	99.64	125.87	282.95	146.58
	7.4	190.94	140.97	190.94	338.16	203.84
	8.6	292.00	201.89	292.00	408.32	280.49
S1100	6.4	127.15	104.08	127.15	406.53	247.44
	7.4	193.29	147.25	193.29	473.92	298.91
	8.6	296.58	210.88	296.58	555.61	357.83

Fonte: Autor (2025)

**Apêndice F.16:** C80 / Enrijecedor = 4S – Cortante Vertical ( $V_v$ )

Classe Aço	$t_w$ [mm]	SCI P355 [kN]	Panedpojaman [kN]	Vglobal,Fe [kN]
S550	6.4	103.26	124.60	432.59
	7.4	151.11	180.15	510.55
	8.6	220.40	258.33	608.15
S690	6.4	108.28	131.55	320.39
	7.4	159.87	192.35	390.52
	8.6	236.11	280.20	479.23
S890	6.4	112.93	138.03	440.40
	7.4	168.06	203.89	518.37
	8.6	251.02	301.34	724.42
S960	6.4	115.04	140.80	398.58
	7.4	171.50	208.45	475.24
	8.6	256.81	309.08	572.43
S1100	6.4	117.04	143.61	572.67
	7.4	175.06	213.51	666.04
	8.6	263.37	318.49	778.90

Fonte: Autor (2025)