

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DE PERFIS FORMADOS A FRIO TIPO Z COM ALMA ENRIJECIDA POR MEIO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA DIRETA: CORTANTE E FLEXÃO

Alessandra Roma Vieira da Silva*

Universidade de Brasília/Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Brasília/Brasil

Almir Benedito de Lima Júnior

Universidade de Brasília/ Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil/Brasília/Brasil

Guilherme Santana Alencar

Universidade de Brasília/ Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil/Brasília/Brasil

RESUMO

Perfis formados a frio são muito utilizados em construções metálicas, mas devido a sua esbelteza sofrem instabilidade estrutural. A fim de melhorar o desempenho contra flambagem, uma nova seção com geometria melhorada por enrijecedores de borda e de alma foi lançada no mercado brasileiro, a ZPRO da Isoeste Metálica®. Entretanto, há pouco conhecimento sobre dimensionamento na literatura técnica. Esse trabalho de pesquisa tem como objetivo a análise do comportamento da terça submetida a esforços de cisalhamento e momento fletor através de ensaios experimentais e numéricos, utilizando o Método da Resistência Direta previsto na norma AISI S100 (2016) e o software Thin-Wall-2 para Método Semi-Analítico das Faixas Finitas (MSAFF), com foco na flambagem local. Ensaios de três pontos com três alturas de terças foram conduzidos em setup que preveniu flambagens globais e distorcionais, por meio de cantoneiras e posicionamento das terças. O resultado da pesquisa foi satisfatório, ressaltando a importância do estudo da interação momento-cortante e indicando uma norma conservadora.

PALAVRAS-CHAVE: Seção Z Perfil Formado a Frio, Flambagem Local Elástica, Método da Resistência Direta, Método das Faixas Finitas Semi-analítico, Cisalhamento e Flexão.

ABSTRACT

Cold-formed steel profiles are widely used in steel structures; however, due to their slenderness, they are susceptible to structural instability. In order to improve buckling performance, a new section with enhanced geometry through edge and web stiffeners was introduced to the Brazilian market, the ZPRO section by Isoeste Metálica®. Nevertheless, there is limited knowledge in the technical literature regarding its design. This research aims to analyze the behavior of purlins subjected to shear force and bending moment through experimental and numerical studies, using the Direct Strength Method prescribed by AISI S100 (2016) and the Thin-Wall-2 software based on the Semi-Analytical Finite Strip Method (SAFSM), with emphasis on local buckling. Three-point bending tests were carried out on purlins with three different depths, using a test setup that prevented global and distortional buckling through the use of angle braces and appropriate purlin positioning. The results were satisfactory, highlighting the importance of studying the moment–shear interaction and indicating that the design standard provides conservative predictions.

KEYWORDS: Cold-Formed Z Section, Local Buckling, Direct Strength Method, Semi-Analytical Finite Strip Method, Shear and Bending

*Autor correspondente: alessandrromacivil@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

As terças são elementos metálicos e amplamente utilizados em coberturas para suportar cargas e transferi-las à estrutura principal, garantindo estabilidade, especialmente em grandes vãos como galpões e estádios. O processo de produção de terças de perfil formado a frio que envolve o processo de dobras, no qual é realizado por meio de prensas, ou pelo processo de perfiladeira, que envolve um processo contínuo em que a chapa de aço passa por uma série de cilindros até a seção original.

Ao longo das últimas décadas, a engenharia demanda a otimização de materiais para um uso mais consciente e econômico em que mantém a segurança e a estabilidade (Wei-Wen Yu, Helen Chen, 2020). Dessa forma, os perfis formados a frio (Figura 1.1) alavancaram a sua significância na área devido às características físicas, como leveza e esbelteza, e estruturais, por exemplo alta relação resistência/peso e capacidade de vencer grandes vãos (Silva, Edson Lubas; Pierin; Pignatta, 2014).



Figura 1.1. Perfis formados a frio.
Fonte: Juliana Santos Wagner, 2019.

Não obstante, a precoce instabilidade estrutural de perfis formados a frio não permite a plastificação total da seção, em razão à geometria do elemento (Silva, Edson Lubas; Pierin; Pignatta, 2014). A fim de melhorar o desempenho, a indústria vem desenvolvendo perfis Z com geometria complexa (com enrijecedores de borda e alma), de forma que o ganho da inércia ocorre pela forma da seção transversal, como a ZPRO® da Isoeste Metálica (Figura 1.2). O uso de enrijecedores de alma é uma prática consagrada e prevista na norma brasileira NBR 14762 (ABNT, 2010), por contribuir para o aumento da eficiência estrutural. Contudo, os métodos e critérios específicos para seu dimensionamento ainda são pouco explorados na literatura técnica e a norma brasileira não aborda como obter a flambagem por cisalhamento para perfis com geometria complexa (Benedito et al., 2024).



Figura 1.2. Terça com geometria complexa ZPRO®.
Fonte: Isoeste Metálica

A fim de compreender o comportamento e a resistência de perfis formados a frio é utilizado o Método da Resistência Direta (MRD), que, a partir de estudos sobre instabilidade, oferece previsões mais precisas. Esse método foi incorporado ao American Iron and Steel Institute na norma AISI S100 para prever a resistência de terças submetidas à flexão e compressão, em 2004, como um método alternativo ao tradicional Método da Largura Efetiva (MLE), tornando-se um elemento-chave nos projetos de estruturas de aço.

1.1 Objetivos

Objetivo geral:

Avaliar o comportamento estrutural de terças formadas a frio de seção Z com alma enrijecida submetida a esforços combinados de cisalhamento e momento fletor, com foco na resistência última e nos modos de flambagem local e por cisalhamento da alma, por meio de ensaios experimentais e comparação com as predições normativas.

Objetivo específico:

- Utilização da terça ZPRO® como corpo de prova a fim de propor um procedimento padronizado para o cálculo da resistência nominal ao cisalhamento aplicável ao projeto estrutural;
- Avaliar a precisão das previsões fornecidas pelo método normativo (MRD) em comparação aos resultados experimentais;
- Preencher a lacuna de seções Z com alma enrijecida na literatura técnica, oferecendo dados e modelos confiáveis que possam subsidiar futuras normas e aplicações estruturais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Diversos estudos investigaram terças Z de aço formado a frio. Yu e Schafer, (2005, 2003) evidenciaram que as resistências previstas no AISI não eram precisas como o Método da Resistência Direta (MRD), que apresentou previsões confiáveis. Pham et al. (2014) evidenciaram a importância da interação flexão-cisalhamento e o efeito positivo de travamentos na mesa comprimida em relação à rigidez e resistência. Ademais, Hui et al. (2016) avaliaram redistribuição de momentos em vigas contínuas, propondo o uso de conceitos de teoria

plástica e o fator de redução (α) que considera esbeltez e razão vão/altura, aplicável ao ZPRO devido a similaridade com o estudo dele na Zeta I. Mais recentemente, Almatrafi et al. (2021); Li & Young, 2023 e Silva & Malite, 2020 confirmaram que enrijecedores aumentam a resistência à flambagem, especialmente ao cisalhamento, e alteram os modos de falha, reforçando que o MRD é mais adequado que a largura efetiva e permitindo ajustes nas curvas para interações locais, como no caso de seções com cantoneiras que evitam flambagem distorcional.

2.1 Análise de estabilidade elástica

As espessuras delgadas das terças formadas a frio resultam em diversos modos de instabilidade estrutural, as quais são identificadas a partir da análise de estabilidade elástica de um perfil, que determina as tensões críticas. Nesse contexto, cada modo apresenta uma forma de deformação e um comprimento de meia onda característico associados, o que indica a ocorrência de flambagem local, distorcional ou global (Figura 2.1).

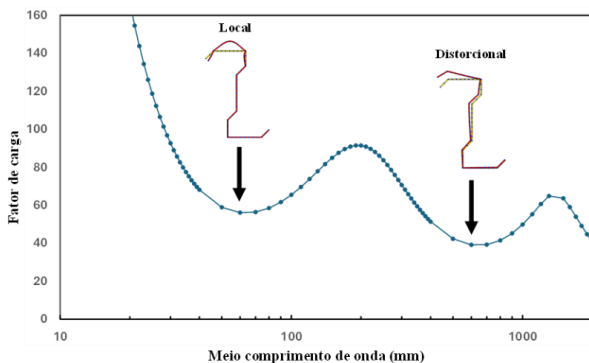


Figura 2.1. Curva de assinatura elástica
 Fonte: relatório técnico Isoeste Metálica

Associada ao primeiro vale da curva de assinatura, a flambagem local ocorre em barras de menores comprimentos, em geral com ordem de grandeza da largura da alma (Silva, 2018). Ela ocorre sem translação ou mudança nos ângulos entre os elementos da terça, e é caracterizada por deslocamentos na direção normal ao plano da chapa. Em contrapartida, a distorcional ocorre em barras de comprimento intermediário, caracterizando-se pela rotação e translação do conjunto formado pela mesa comprimida e seu enrijecedor em relação à alma (Silva, 2018) Os modos de flambagem podem atuar em combinação, mas métodos como o de faixas finitas permitem separá-los. Além disso, as condições de contorno influenciam o comportamento estrutural,

podendo resultar em momentos críticos mais conservadores (Trahair, 2018).

2.2 Método da Resistência Direta (MRD)

O Método da Resistência Direta é uma abordagem moderna para dimensionamento de PFF, a qual supera limitações do Método da Largura Efetiva (MLE) (Schafer, 2008). Baseia-se na determinação das tensões críticas de flambagem elástica e do momento de início escoamento da seção completa (M_y). Diferente do MLE, o MRD considera a interação entre elementos da seção, oferecendo maior precisão e depende de análises computacionais, como o Método das Faixas Finitas (MFF) e Método dos Elementos Finitos (MEF).

Conforme a AISI S100 (2016), o MRD calcula a resistência nominal à flexão usando a seção transversal bruta completa, com equações específicas para flambagem local e distorcional, sem processos iterativos. Para membros sem furos, a resistência à flambagem local é definida a partir da esbeltez reduzida (λ), considerando a razão entre o momento de flambagem global lateral-torção (M_{ne}) e o momento crítico elástico local (M_{crl}) conforme a equação:

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (1)$$

A resistência nominal (M_{nl}) é então obtida da seguinte forma:

- Para membros com baixa esbeltez local ($\lambda \leq 0,776$):

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (2)$$

Assim, a flambagem local não é crítica, e a flambagem global limita a resistência da seção.

- Para membros com alta esbeltez local ($\lambda > 0,776$):

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \cdot \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \cdot M_{ne} \quad (3)$$

Ou seja, a resistência nominal reduz à medida que aumenta a esbeltez local do perfil, levando em conta a perda de capacidade resistente provocada pela instabilidade elástica da seção.

2.2 Resistência ao cortante de PFF

Quando a alma apresenta baixa razão h/t , o dimensionamento ao cisalhamento é governado pelo escoamento do material. Para almas sem enrijecedores e com alta razão h/t , a limitação ocorre por flambagem elástica. Já em almas com razão intermediária, a resistência é definida pela flambagem inelástica ao cisalhamento.

A resistência nominal ao cisalhamento (V_n) de membros fletidos é obtida a partir de dois parâmetros principais: a força crítica de flambagem elástica (V_{cr}) e a resistência ao escoamento da seção (V_y). De acordo com AISI S100 (2016), é possível calcular V_n da seguinte forma:

- Para $\lambda_v \leq 0,815$:

$$\begin{aligned} V_n &= V_y = 0,6 A_w F_y \\ A_w &= h_w \end{aligned} \quad (4)$$

- Para $0,815 < \lambda_v \leq 1,227$:

$$V_n = 0,815 \cdot \sqrt{V_{cr} \cdot V_y} \quad (5)$$

- Para $\lambda_v > 1,227$:

$$V_n = V_{cr} = 0,904 E k_v \frac{t^3}{h} \quad (6)$$

Em que $\lambda_v = \sqrt{\frac{V_y}{V_{cr}'}}$, E é o módulo de elasticidade do aço, h é a altura da porção plana da alma, t é a espessura da alma e k_v é o coeficiente de flambagem por cisalhamento de qualquer seção de PFF aberta com apenas uma alma e uma mesa comprimida com enrijecedor de borda. Para geometrias complexas, é necessário recorrer à métodos numéricos.

Para os que estão sujeitos a flexão e possuem enrijecedores transversais de alma (que o espaçamento não exceda o dobro da altura da alma), a resistência nominal ao cortante é determinada por:

- Para $\lambda_v \leq 0,776$:

$$V_n = V_y \quad (7)$$

- Para $\lambda_v \geq 0,776$:

$$V_n = \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{V_{cr}}{V_y} \right)^{0,4} \right] \cdot \left(\frac{V_{cr}}{V_y} \right)^{0,4} \cdot V_y \quad (8)$$

3. METODOLOGIA

3.1 Análise numérica de estabilidade elástica de viga sujeita a cortante

As fórmulas analíticas da norma AISI S100 (2016) não atende a geometria complexa da ZPRO. Assim, recorre-se a métodos numéricos para determinar força crítica de flambagem elástica ao cisalhamento (V_{cr}). Neste trabalho, adota-se Método Semi-Analítico das Faixas Finitas (MSAFF), considerando extremidades simplesmente apoiadas. Implementou-se as propriedades geométricas no software THIN-WALL-2, desenvolvido na Universidade de Sydney, o qual já foi aplicado em estudos de resistência ao cisalhamento pelo MRD em perfis U e Z enrijecidos e permite análises elásticas de flambagem de seções arbitrárias sob cortante uniforme.

Para este trabalho, adotou-se coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade do aço de 200.000 MPa. Para representar a espessura real sem galvanização, foi considerado um desconto de 0,05 mm em relação à espessura nominal. As análises numéricas de flambagem elástica foram realizadas com aproximadamente 38 faixas finitas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

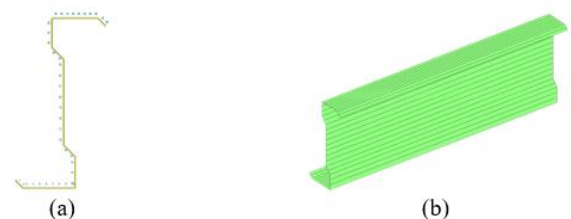


Figura 3.1. (a) Malha das faixas finitas de todas as seções ZPRO no THIN_WALL-2; (b) vista em perspectiva do elemento gerado no software

3.2 Idealização e montagem dos ensaios de flexão em três pontos

Para o ensaio experimental, utilizou-se duas vigas apoiadas com suportes nas duas extremidades e uma força concentrada no centro do vão (a qual maximiza as forças de cortante nas vigas distribuída entre as duas terças por uma viga. A distância entre as linhas de parafuso sob o carregamento e os pontos de suporte define o vão de cisalhamento. A fim de prevenir flambagem global lateral, as mesas inferiores das terças são voltadas para dentro, e para prevenir a flambagem distorcional, parafusou-se cantoneiras às

mesas. Observar Figura 3.2.1.

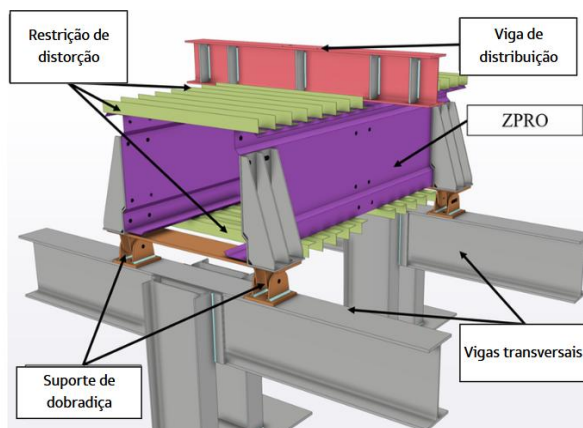


Figura 3.2.1. Setup experimental

Ademais, a carga foi aplicada um braço hidráulico ENERPAC® (capacidade máxima de 294,2 kN e curso de 600 mm) e medida por uma célula de carga C50T (Alfa Instrumentos Ltda.), posicionada entre rótulas esféricas, devidamente alinhada antes de cada ensaio (Figura 3.2.2) e calibrada por empresa certificada pelo INMETRO (Competec–Anápolis/GO). Além disso, réguas potenciométricas posicionadas ao meio do vão nas mesas inferiores da terças para medição do deslocamento durante a aplicação da carga, a qual foi transferida dos suportes diretamente para a alma por meio de ligação parafusada para evitar falha por esmagamento ou enrugamento da alma. Além disso, a fim de verificar as deformações na alma, utilizou-se, no ensaio da ZPRO300, extensômetros elétricos do tipo roseta (capaz de medir tanto axial, longitudinal e vertical quanto inclinado a 45°) a um quarto do vão.

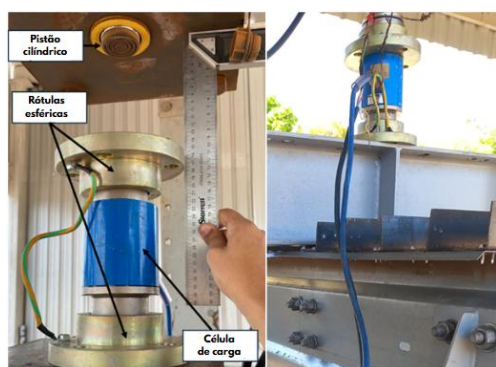


Figura 3.2.2. Posicionamento e montagem do sistema de carregamento

Apoios, cantoneiras, vigas de apoio e viga de distribuição foram fabricados pela ISOESTE Metálica, com suportes inclinados para aplicação das cargas e reação diretamente nas almas das terças. As vigas de apoio foram fixadas em cavaletes metálicos e

ancoradas à pista de concreto armado (previamente dimensionada para suportar tais cargas elevadas), devidamente niveladas e alinhadas. As terças ZPRO foram parafusadas com duas linhas de parafusos por conexão, pré-apertadas e torqueadas, seguida da aplicação de uma pré-carga de 2 kN para assentamento. Após isso, o carregamento monotônico foi aplicado até a falha do corpo de prova, com registros contínuos das cargas.

3.3 Geometria dos corpos de prova utilizados no ensaio

Para o ensaio, utilizou-se três alturas diferentes da terça ZPRO®: 200, 300 e 500. A Tabela 1 apresenta todas as dimensões medidas dos espécimes reais fabricadas e ensaiadas de acordo com a simbologia da Figura 3.3.

Tabela 1. Dimensões medidas das terças ensaiadas. Unidade em milímetros.

Amostra	ZPRO200	ZPRO300	ZPRO500
Z	204,00	300,00	500,00
h1	38,00	53,00	71,00
h2	46,00	55,00	79,00
h3	81,00	148,00	310,00
b1	75,00	82,00	98,00
b2	82,00	89,00	105,00
e1	16,00	19,00	23,00
e2	16,00	19,00	23,00
da1	29,50	21,00	29,50
da2	29,50	21,00	29,50

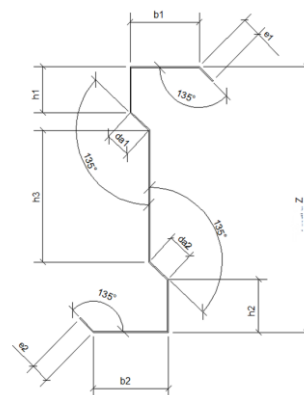


Figura 3.3. ZPRO e definição dos símbolos

Para cada ensaio, adotou-se um rótulo para identificação definido pelo modelo da seção, altura, espessura e série. Por exemplo, 'ZPRO200-2,70-1' indica a terça ZPRO com altura de 200mm e 2,70mm de espessura nominal (incluído revestimento galvanizado) e '1' representa o número da série de repetição do modelo. A Tabela 2 apresenta a

dimensão dos ensaios realizados para flambagem local, todos com aço ZAR400.

Tabela 2. Dimensão dos ensaios.

Designação da amostra	N. de ensaio	a (mm)	a/h	Vão teórico - L (mm)
ZPRO200-1,25	2	315	1,58	700
ZPRO300-1,25	1	465	1,55	1000
ZPRO300-1,55	1	465	1,55	1000
ZPRO500-1,70	2	694	1,39	1500

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cargas atuantes no sistema

A análise experimental forneceu a carga última associada ao modo de falha de cada amostra. Na Tabela 3, apresenta-se a carga máxima (P_u) considerando tanto a carga aplicada quanto o peso próprio do aparato e dos perfis. Cada ensaio envolveu duas terças; assim, para obter a carga concentrada em cada perfil, os valores devem ser divididos por 2. Para determinar a reação em cada suporte da viga simplesmente apoiada com carga central, divide-se o valor obtido novamente por 2.

Tabela 3. Resultado das cargas máximas do ensaio de flexão em 3 pontos

Espécime	P_u (kN)
ZPRO200-1,25-1	86,56
ZPRO200-1,25-2	87,76
ZPRO300-1,25-1	106,74
ZPRO300-1,55-1	141,96
ZPRO500-1,70-1	202,81
ZPRO500-1,70-1	203,56

4.2 Análises de estabilidade elástica e MRD

Os resultados da análise de flambagem elástica ao cortante de todas as terças indicaram flambagem local da alma. Ademais, no Thin-Wall-2, assumiu-se perfis simplesmente apoiados nas extremidades em todos os casos. A Tabela 4 apresenta os valores da força crítica de flambagem elástica para cada terça e seu comprimento de cisalhamento respectivo e idêntico ao ensaio. Além disso, as Figuras 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 representam a área de altas tensões (sempre concentradas na alma demonstrando a flambagem local) e a curva de assinatura de flambagem elástica das terças na mesma ordem apresentada na tabela.

Tabela 4. Resultado da análise de flambagem elástica ao cortante

Terça	V_{cr} (kN)	Comprimento do cisalhamento
ZPRO200-1,25	71,20	315
ZPRO300-1,25	44,13	465
ZPRO300-1,55	75,01	465
ZPRO500-1,70	37,07	694

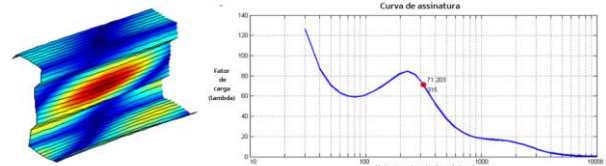


Figura 4.2.1. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante- ZPRO200-1,25 para comprimento de cisalhamento de 315mm

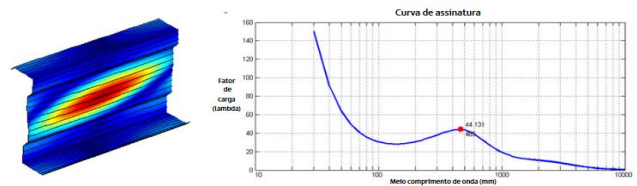


Figura 4.2.2. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante- ZPRO300-1,25 para comprimento de cisalhamento de 465mm

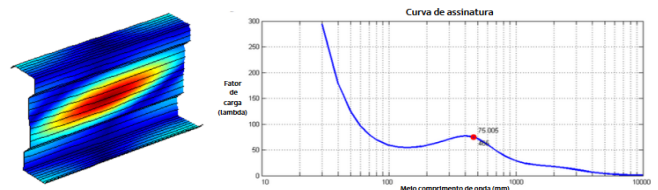


Figura 4.2.3. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante- ZPRO300-1,55 para comprimento de cisalhamento de 465mm

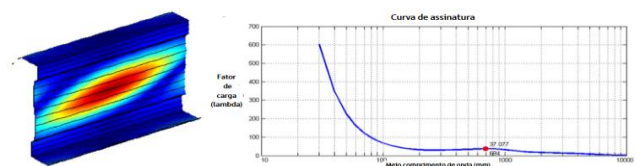


Figura 4.2.4. Modo de flambagem local da alma para cortante puro e curva de assinatura de flambagem elástica ao cortante- ZPRO500-1,70 para comprimento de cisalhamento de 694mm

Para avaliar os resultados experimentais e compará-los com a resistência ao cisalhamento

prevista pelo AISI, adota-se como referência as V_{cr} indicadas na Tabela 4. Devido a restrição completa das mesas à flambagem distorcional e do enrijecimento proporcionado pelos suportes (posição com menos de duas vezes a altura), considera-se o mesmo vão de cisalhamento dos ensaios para o MRD. A Tabela 5 expõe os valores obtidos de acordo com AISI S100 (2016), em que $V_{n,tf}$ representa a resistência nominal ao cisalhamento de terças considerando o efeito benéfico do campo de tração.

Tabela 5. Cálculo de acordo com AISI S100 (2016)

Amostra	ZPRO200	ZPRO300-	ZPRO300	ZPRO500
	-1,25	1,25	-1,55	-1,70
a(mm)	315	465	465	694
V_y (kN)	56,22	85,02	105,84	195,39
V_{cr} (kN)	71,20	44,13	75,01	37,07
λ_v	0,89	1,39	1,19	2,30
V_n (kN)	52,34	40,75	69,81	37,07
$V_{n,tf}$ (kN)	51,60	57,85	80,17	92,74
M_{nl} (kNm)	8,23	13,88	19,68	45,18

4.3 Resultados experimentais

Durante o experimento, as terças obtiveram modo de falha de flambagem local das mesas com instabilidade local da alma dos ensaios, com deformação por cortante excessiva, que está evidente nas fotografias na Figura 4.3.1. A Figura 4.3.2 apresenta gráficos força versus deslocamento para o centro do vão nos ensaios. Os atrasos iniciais nos registros de deslocamento devem-se ao assentamento do setup experimental e ao pequeno gap necessário para garantir contato contínuo e estável do sensor.



Figura 4.3.1. Modo de falha, respectivamente, da ZPRO200-1,25-1; ZPRO200-1,25-2; ZPRO300-1,25-1; ZPRO300-1,55-1; e ZPRO500-1,70-1.

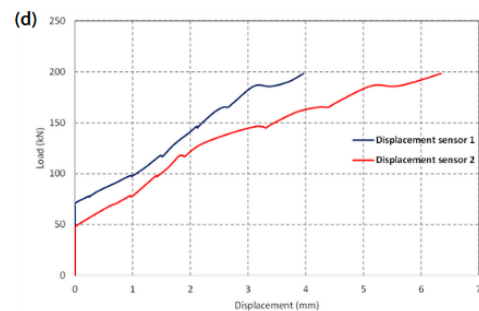
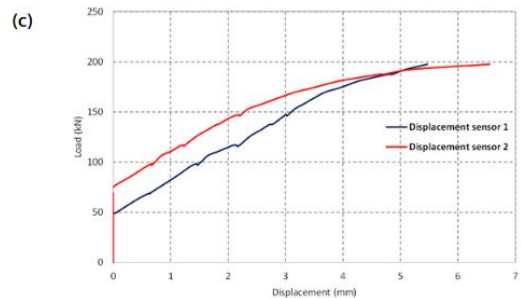
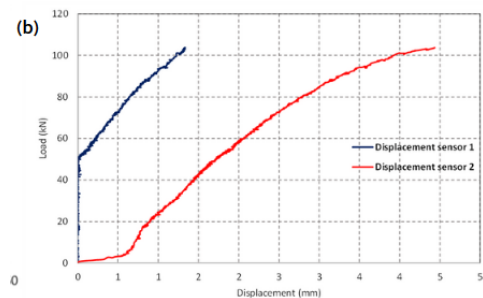
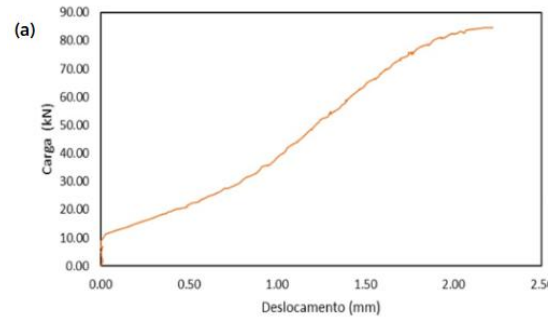


Figura 4.3.2. Gráfico força versus deslocamento das terças (a) ZPRO200-1,25-1 (b) ZPRO300-1,25-1 (c) ZPRO500-1,70-1 (d) ZPRO500-1,70-2

A Tabelas 6 apresenta, para cada amostra, o cortante último experimental ($V_u = P_u/4$) e o momento fletor último por terça ($M_u = P_u \cdot L/8$), calculados a partir de P_u (força máxima na célula de carga somada ao peso próprio dos elementos e aparatos) obtido na Tabela 3 e dos dados da Tabela 2.

Tabela 6. Cálculo de acordo com AISI S100 (2016)

	Vu (kN)	Mu (kNm)
ZPRO200-1,25-1	21,64	7,57
ZPRO200-1,25-2	21,94	7,68
ZPRO300-1,25-1	26,69	13,34
ZPRO300-1,55-1	35,49	17,75
ZPRO500-1,70-1	50,70	38,03
ZPRO500-1,70-2	50,89	38,17

4.3 Interação momento-cortante AISI S100 (2016)

Eficiência de interação é calculado por:

$$E. i. = \left[\left(\frac{M_{exp}}{M_{nl}} \right)^2 + \left(\frac{V_{exp}}{V_{nl}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Tabela 7. Interação momento fletor e esforço cortante com coeficiente mínimo e sem coeficiente de segurança, com flexão restringida.

	Vexp/Vn,t f	Mexp/Mn l	Eficiência de Interação
ZPRO200-1,25-1	0,42	0,92	1,01
ZPRO200-1,25-2	0,42	0,93	1,02
ZPRO300-1,25-1	0,46	0,96	1,07
ZPRO300-1,55-1	0,44	0,90	1,00
ZPRO500-1,70-1	0,55	0,84	1,00
ZPRO500-1,70-2	0,55	0,84	1,01

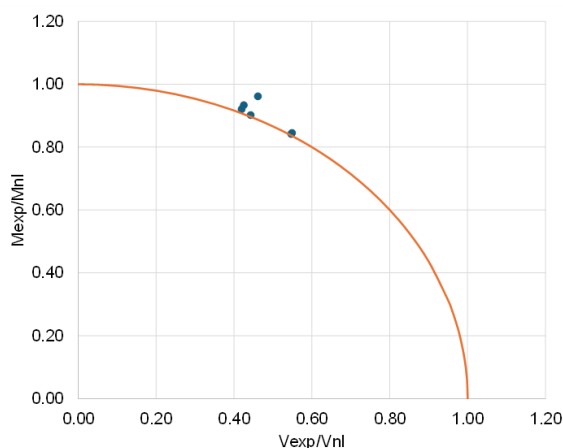


Figura 4.4. Interação momento fletor e cortante (MRD/AISI S100 2016)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS / CONCLUSÃO

Essa pesquisa objetivou a investigação comportamental de uma terça Z com alma enrijecida submetida à flexão e cortante. Visando a compreensão da resistência estrutural, realizou-se

ensaios experimentais com a terça ZPRO da Isoeste Metálica, a modelagem no software de faixas finitas Thin-Wall-2 e cálculos com Método da Resistência Direta baseados na AISI S100 (2016).

Os ensaios experimentais mostraram flambagem local da mesa com instabilidade da alma, enquanto o software apresentou flambagem local da alma. Logo, ao observar as fotos dos ensaios e as do programa computacional, é possível perceber semelhanças da concentração das forças e deformações, apesar de o software não apresentar deformação na mesa da terça. Ademais, os resultados numéricos das três formas foram satisfatórios. Demonstrou-se relevante também as condições de apoio e imperfeições, dado que a diferença numérica é coerente com a consideração da terça ser simplesmente apoiada no Thin-Wall-2.

Percebe-se que tanto a razão Vexp/Vn,t quanto a Mexp/Mnl obtiveram resultados inferiores a um. Dessarte, não haveria falha de apenas cortante ou apenas flexão. Entretanto, quando há a combinação dos dois, obtém-se um número superior a um, manifestando a falha da terça. Isso indica a importância do estudo da interação momento-cortante. Além disso, perfis de maior altura e espessura da alma apresentaram maior valor de interação, demonstrando como a ação combinada dos esforços provoca uma redução mútua da capacidade de resistência. No gráfico relacionado à combinação, é perceptível que não há nenhum ponto abaixo da linha limite, o que nos garante que a norma utilizada é conservadora.

REFERÊNCIAS

- AISI S100. AISI S100-16: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. [s. l.], p. 505, 2016.
- ALMATRAFI, M.; THEOFANOUS, M.; DIRAR, S.; GKANTOU, M. Structural response of cold-formed lipped Z purlins – Part 1: Experimental investigation. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 161, no. January, p. 107452, 2021. DOI 10.1016/j.tws.2021.107452. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107452>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço construídas por perfis formados a frio**. [S. l.: s. n.], 2010.
- BENEDITO, A.; FERNANDES, D.; ALENCAR, G. S.; LUÍS, J.; BRITO, V. De. Web shear buckling capacity of a stiffened Z-purlin : reporting of experimental tests. [s. l.], 2024. .
- HUI, C.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Moment redistribution in cold-formed steel continuous beams. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 98, p. 465–477, 2016.

- DOI 10.1016/j.tws.2015.10.009. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.009>.
- LI, Q.-Y.; YOUNG, B. Experimental and numerical investigation on cold-formed steel zed section beams with complex edge stiffeners. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 194, p. 111315, Jan. 2023. DOI 10.1016/j.tws.2023.111315. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823123007930>.
- PHAM, C. H.; DAVIS, A. F.; EMMETT, B. R. Numerical investigation of cold-formed lapped Z purlins under combined bending and shear. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], vol. 95, p. 116–125, 2014. DOI 10.1016/j.jcsr.2013.11.015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.11.015>.
- SCHAFFER, B. W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. **Journal of Constructional Steel Research**, [s. l.], vol. 64, no. 7–8, p. 766–778, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>.
- SILVA, E. L.; PIERIN, I.; PIGNATTA, V. **MANUAL - Estruturas Compostas por Perfis Formados a Frio - Dimensionamento pelo Método das Larguras Efetivas e Aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT 6355:2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2014.
- SILVA, J. M. M. **Terças de aço em perfis formados a frio com alma enrijecida: ênfase na força cortante e na interação momento fletor - força cortante**. 2018. 144 f. 2018.
- SILVA, J. M. M.; MALITE, M. Longitudinally stiffened web purlins under shear and bending moment. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 148, no. December 2019, p. 106616, 2020. DOI 10.1016/j.tws.2020.106616. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106616>.
- TRAHAIR, N. S. Non-linear biaxial bending of steel Z-beams. **Thin-Walled Structures**, [s. l.], vol. 129, no. October 2017, p. 317–326, 2018. DOI 10.1016/j.tws.2018.04.012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.012>.
- WEI-WEN YU, HELEN CHEN, and R. A. L. **Cold-Formed Steel Design**. 5th ed. [S. l.: s. n.], 2020.
- YU, C.; SCHAFFER, B. W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. **Seventeenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction**, [s. l.], no. April, p. 19–45, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2006\)132:4\(515\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:4(515)).
- YU, C.; SCHAFFER, B. W. Local Buckling Tests on Cold-Formed Steel Beams. **Journal of Structural Engineering**, [s. l.], vol. 129, no. 12, p. 1596–1606, Dec. 2003. DOI 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1596). Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282003%29129%3A12%281596%29>.