



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2023**
9º Congresso de Construção Metálica
21 de setembro de 2023, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Estabilidade e resistência de perfis formados à frio

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE TERÇAS Z COM ALMA ENRIJECIDA COM TRANSPASSE

Francisco Tiago da Silva Sales¹

Ana Luísa de Lima²

Luís Augusto Conte Mendes Veloso³

José Humberto Matias de Paula⁴

Lenildo Santos da Silva⁵

Guilherme Santana Alencar⁶

Resumo

Perfis Z de alma enrijecida, comparados aos perfis Z de alma plana, podem apresentar maior resistência à flambagem local, fenômeno este comum a essa categoria de elementos metálicos de elevada esbelteza. O presente estudo objetiva, a partir de um conjunto limitado de ensaios experimentais em escala real com terças de perfil Z de alma enrijecida, realizados pela ISOESTE Metálica em parceria com a Universidade de Brasília, comparar os resultados obtidos de carga crítica de colapso com os resultados teóricos alcançados pelo Método da Resistência Direta, presente na ABNT NBR 14762 [1]. A configuração dos ensaios experimentais é formada por pares de vigas contínuas transpassadas com travamentos laterais de correntes rígidas, com aplicação da carga de forma a gerar 4 forças pontuais nas vigas de ensaio, transmitidas por vigas de perfil laminado. A seção do perfil estudado foi desenhada no software CUFSM, com recurso ao método das faixas finitas, para a extração dos valores de momentos críticos de flambagem elástica na flexão simples, tanto em torno do eixo x, quanto em torno do eixo y. A partir dos valores de carga crítica obtidos experimentalmente, foi possível determinar os momentos e compará-los com os valores teóricos, utilizando a equação de flexão oblíqua de iteração entre os momentos M_x e M_y . De um modo geral, foi satisfatória a comparação da resistência experimental com a resistência analítica à flexão oblíqua, ao passo que confirma o impacto do momento em torno de eixo de menor inércia no desempenho real do perfil.

Palavras-chave: Perfis Formados a Frio; Análise Experimental; Método da Resistência Direta (MRD).

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COLD FORMED Z PURLINS WITH OVERLAPPED WEB STIFFENERS

Abstract

Stiffened web Z profiles for roof purlins, compared to flat web Z profiles, usually presents greater resistances to local buckling, which is a common phenomenon to cold formed elements with a high slenderness ratio. This research aims to compare results obtained through experimental continuous four-point bending tests and the theoretical resistance estimated through the Direct Strength Method, according to ABNT NBR 14762 [1]. The experimental tests were carried out by a joint effort between ISOESTE Metálica and University of Brasília (UnB). The tests were conducted with pairs of continuous overlapped beams restrained by lateral struts in the profile web, with load application in order to generate 4 concentrated forces on the test beams, transmitted by rolled steel spread beams. The studied sections were drawn in the CUFSM software, using the finite strip method, to extract the values of critical elastic buckling moments in simple bending, both about the x and y axes. Based on the critical load values obtained, it is possible to determine the moments and associate the experimental values to the theoretical values utilizing the interaction bending equation for biaxial bending, considering both M_x and M_y bending moments. In general, the comparison between the experimental resistances and the analytical resistances to biaxial bending was shown to be satisfactory, which ensures the reliable use of these steel profiles in cold formed civil construction.

Keywords: Cold-Formed Steel; Roof Purlins; Experimental Analysis; Direct Strength Method (MSD).

¹ Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

² Graduanda em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

³ Professor, Doutor em Engenharia Civil pela USP, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

⁴ Professor, Mestre em Estruturas pela UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

⁵ Professor, Doutor em Geotecnia pela UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

⁶ Professor, Doutor em Engenharia de Estruturas pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os perfis metálicos possuem grande importância e aplicabilidade em diversas áreas, em especial no ramo da construção civil. Dentre os grupos de perfis mais utilizados, estão os perfis formados a frio (PFF). Este grupo destaca-se por gerar componentes estruturais mais leves em comparação aos perfis soldados e laminados quando utilizados em estruturas com cargas e vãos médios, além de otimizarem o transporte, estoque, manuseio e apresentarem diversidade de seções e bitolas.

Os perfis formados a frio em Z enrijecido tem grande parte de suas aplicações em telhas de coberturas metálicas e, de acordo com Silva e Malite [2], diferenciam-se pela possibilidade de sobreposição com diferentes larguras de abas, o que proporciona continuidade e dupla espessura nos apoios internos. A ISOESTE Metálica fabrica um perfil com alma enrijecida do tipo corrugada, que será objeto de estudo neste trabalho (ver Figura 1.1d).

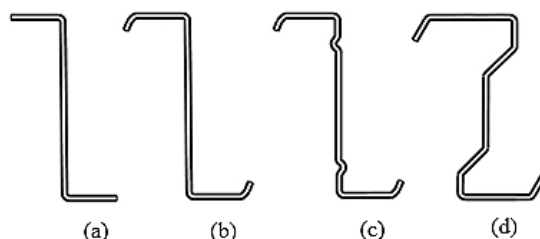


Figura 1.1 - Tipos de telhas em perfis formados a frio: (a) Terça Z com alma plana sem enrijecedor de borda; (b) Terça Z com alma plana com enrijecedor de borda de 45 graus; (c) Terça Z com alma plana enrijecida; (d) Terça Z com alma enrijecida em formato corrugado. Fonte: modificado de Kyvelou *et al* [3].

Por se tratar de uma barra de seção aberta e espessura reduzida, este tipo de perfil está, diferentemente dos outros grupos de perfis laminados e soldados, mais suscetível a fenômenos de instabilidade local e que devem ser verificados durante a análise estrutural, como a flambagem local e a distorcional. As razões para a ocorrência dessas instabilidades estão condicionadas às propriedades geométricas do perfil e às condições de vínculo dos elementos da barra. Como os demais perfis, também devem ser verificados à instabilidade global, representada pela flambagem lateral com torção, diretamente influenciada pelo momento de inércia à torção e pelo comprimento destravado da barra.

A flambagem distorcional é um fenômeno de instabilidade comum a perfis com enrijecedores e mais pronunciado para aplicações de elevada resistência mecânica, conforme afirma Chodraui [4], podendo governar o dimensionamento do perfil. Consiste na alteração da forma inicial da seção transversal, diferentemente da flambagem local, com rotação dos elementos comprimidos, assumindo configurações como expostas na Figura 1.2, a partir das quais torna-se possível identificar o esforço na seção (compressão centrada ou momento fletor).

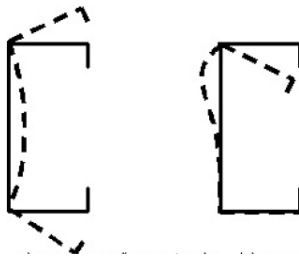


Figura 1.2 - Flambagem distorcional por compressão centrada e por momento fletor, respectivamente. Fonte: Silva *et al* [5].

Em suma, o objetivo deste trabalho é obter experimentalmente os momentos solicitantes que causam falha por flambagem distorcional em uma seção de interesse em torno dos eixos principais de inércia e compará-los com as resistências analíticas, bem como exemplificar a existência de momento fletor em torno do eixo y . Também espera-se encontrar para a equação de interação da flexão oblíqua (adaptada da equação de interação de flexão composta segundo a ABNT NBR 14762 [1]), valor próximo a 1, para valores de momento característicos, uma vez que se trata de uma comparação entre resultados experimentais e valores teóricos.

No dimensionamento de barras de aço formados a frio, para obtenção da resistência, pode-se escolher o Método da Resistência Direta (MRD), apresentado no Anexo C da ABNT NBR 14762 [1]; uma vez que possui a força ou momento fletor de flambagem elástica, que podem ser determinados por um programa de elementos finitos ou faixas finitas, os momentos resistentes podem ser facilmente determinados. Este será o método utilizado no presente estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A imposição de momentos fletores solicitantes em torno dos eixos x e y se fez através de um ensaio experimental de flexão de quatro pontos. Já os momentos resistentes da terça foram obtidos via Método da Resistência Direta, de posse dos valores de momentos elásticos de flambagem distorcional extraídos do software de Faixas Finitas intitulado *Cross-Section Elastic Buckling Analysis* (CUFSM).

2.1 Parte experimental

2.1.1 Ensaio de tração do aço

Utiliza-se comumente PFF de aço zincado de alta resistência (ZAR), que são tratados com revestimento de zinco por um processo contínuo de imersão a quente, o qual agrega elevada resistência à corrosão ao material, aumentando a durabilidade. As siderúrgicas comercializam esse aço em forma de bobinas com espessuras que variam de 0,50 a 16 mm e larguras entre 1.000 mm e 1.880 mm. As dimensões variam conforme a especificação de cada fabricante, destaca Donim [6]. Neste trabalho, o aço empregado nos perfis de chapa dobrada é do tipo ZAR 400, com tensão de escoamento nominal de 400 MPa, para o qual foram retiradas amostras e realizados ensaios de tração como rege a ASTM A370. Os valores ajustados a partir deste ensaio e utilizados nos cálculos foram: módulo de elasticidade do aço $E = 194$ GPa e tensão de escoamento $f_y = 470$ MPa.

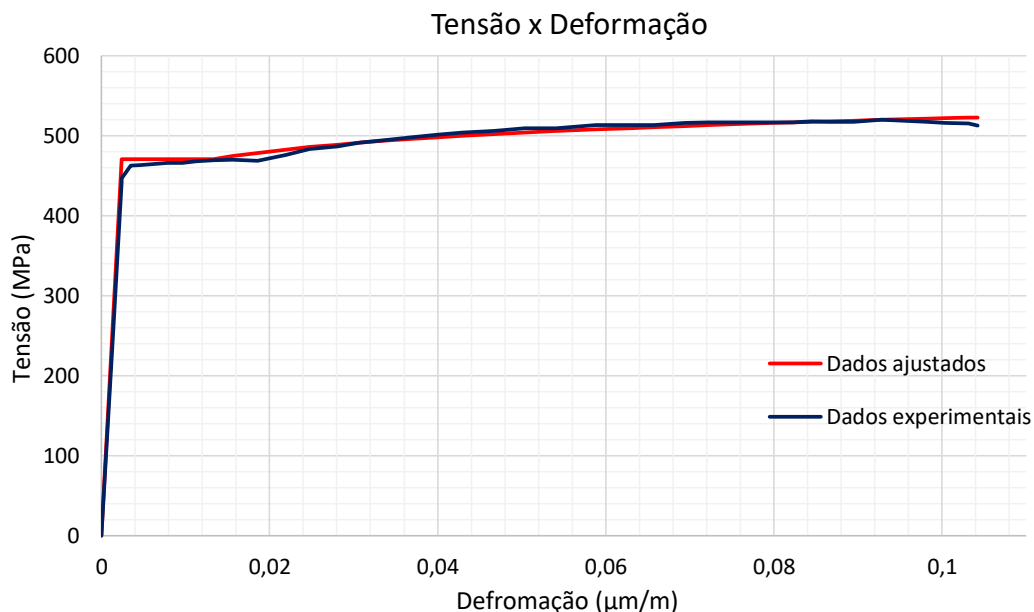


Figura 2.1- Gráfico Tensão x Deformação do aço ZAR-400 da terça Z. Fonte: os autores.

2.1.2 Setup de ensaio e materiais

O experimento realizado consistiu em simular uma flexão de quatro pontos em um par de vigas do perfil Z de alma enrijecida com altura nominal de 300 mm e espessura de 1,90 mm (descontando-se o revestimento zincado) para um vão de 24.000 mm com 3 apoios (apoios de extremidade e um apoio central). O setup de ensaio está representado na Figura 2.2, além das dimensões do perfil na Figura 2.3. Dos materiais utilizados no ensaio, as correntes flexíveis são de aço A36; terças de ensaio e correntes rígidas de chapa dobrada ZAR 400; os perfis laminados tipo W A572 grau 50 para as transversinas, longarina, vigas de apoio e pilarete; e aço A36 para o pórtico de aplicação de carga.

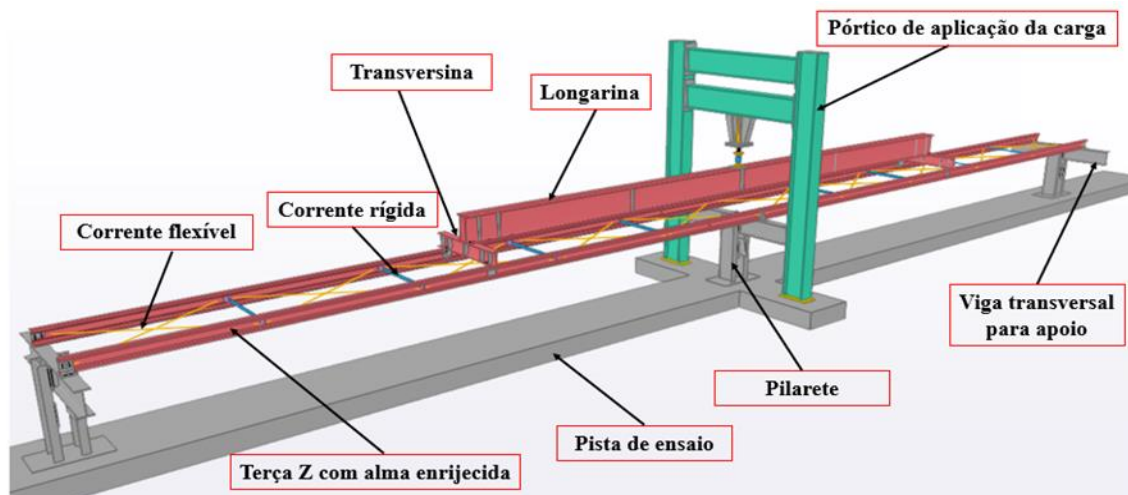


Figura 2.2 - Esquema isométrico de ensaio. Fonte: (Adaptado de Isoeste Metálica).

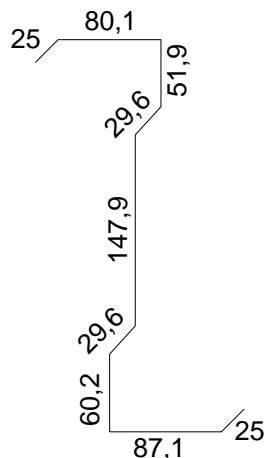


Figura 2.3 - Esquema isométrico de ensaio. Fonte: os autores.

Em síntese, o ensaio constitui-se de um par de vigas travadas lateralmente por correntes rígidas e flexíveis. Cada viga é composta por duas terças de 13200 mm, transpassadas de 2400 mm (Figura 2.4), valor adotado por ser um comprimento usual de transpasse para um vão de 12000 mm, trecho este em que a rigidez da seção transversal é dobrada. Nas extremidades e no vão central, as terças são conectadas aos apoios através de 4 parafusos na alma plana (Figura 2.5). A aplicação de carregamento se dá pela célula de carga, que aplica uma força sobre a longarina, a qual está apoiada sobre duas transversinas, todas em perfis laminados. As transversinas por sua vez atuam como 4 forças pontuais atuando sobre as almas das terças, provocando assim esforços de flexão, com o formato do diagrama de momento fletor como mostra a Figura 2.6 (flexão em torno da maior inércia).

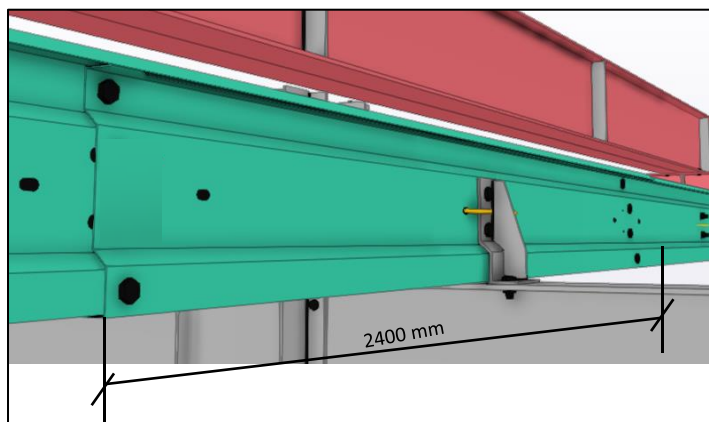


Figura 2.4 – Detalhe da ligação transpassada. Fonte. Adaptado de ISOESTE Metálica.

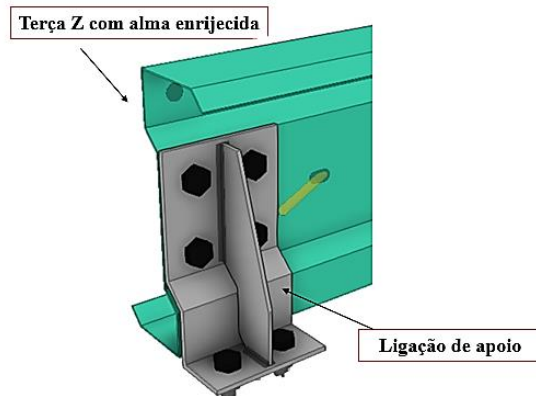


Figura 2.5 – Detalhe da ligação de apoio. Fonte: os autores.

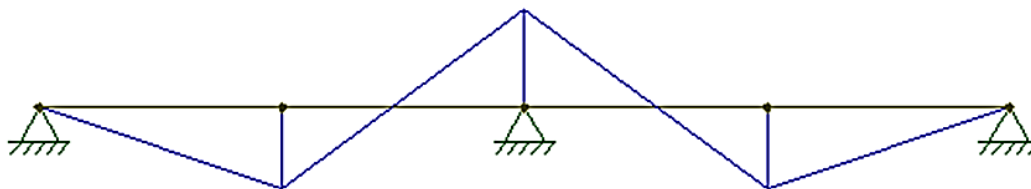


Figura 2.6 – Formato do diagrama de momento fletor M_x (flexão em torno da maior inércia) para uma terça plana. Fonte: os autores.

As seções das terças foram dispostas na configuração como representada na Figura 2.5. Devido ao travamento lateral proporcionado pelo sistema de aplicação e pelo apoio central, desde os estágios iniciais de carregamento no regime linear-elástico induz-se também uma flexão M_y em torno da menor inércia de ambas as terças, com valor proporcional a M_x . A presença deste esforço pode ser demonstrada: i) modelando-se o esquema de ensaio em software de elementos finitos com elemento finito de viga com formulação espacial; ii) pela teoria clássica de vigas com seção com momento principal de inércia rotacionado e sujeito a flexão com travamento lateral (ver Trahair [7]); iii) ou via experimental, por meio da colagem de extensômetros nas mesas do perfil. Os momentos M_y estão ilustrados na Figura 2.7. Trata-se, portanto de uma configuração de ensaio em flexão oblíqua interessante, útil para o estudo do efeito da interação entre os dois esforços (M_x e M_y).

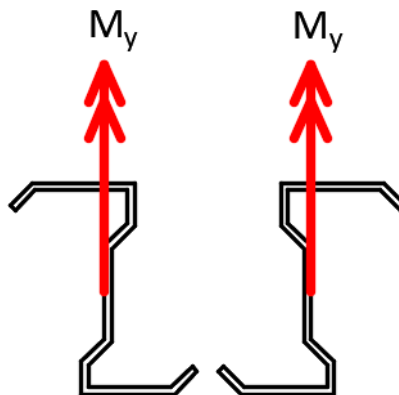


Figura 2.7 - Disposição das seções com ilustração da indução do esforço M_y . Fonte: os autores.

2.1.3 Instrumentação e procedimento experimental

Para a realização dos ensaios com terças de perfil Z com alma enrijecida, foi utilizada a célula de carga do tipo coluna C50T da Alfa Instrumentos para medição das forças aplicadas. Juntamente com a célula de carga, foram utilizadas também duas rótulas entre a célula e o aplicador de carga (marca Enerpac) e entre a célula e a viga de aplicação de força. Para medição das deformações na terça Z foram utilizados extensômetros da fabricante brasileira Excel Sensores, que possuem gage factor $GF = 2,19$ com especificação PA-06-250BA-350-L. Os deslocamentos verticais foram medidos a partir de transdutores de deslocamento do tipo potenciométrico, também conhecidos como réguas potenciométricas, posicionados em pontos específicos dos vãos. As réguas adotadas possuem corpo prismático e curso de 100 mm. O sistema de aquisição utilizado no ensaio é o Lynx ADS-2000, com dois módulos AI2161 de 16 canais cada, ambos de fabricação nacional (Lynxtec). Os programas utilizados para a aquisição e processamento dos dados são o Lynx AqDados e AqAnalysis, também desenvolvidos pela mesma empresa (Lynxtec).

O procedimento experimental se inicia com a fixação de bases magnéticas em suportes e o travamento das réguas potenciométricas nas hastes das bases magnéticas, de forma que a ponta das mesmas fique rente à mesa inferior do perfil, com o objetivo de se medir o deslocamento nestes pontos. Os pontos escolhidos para medição do deslocamento vertical são os de maior deslocamento no esquema da viga contínua, próximos aos pontos de aplicação de carga. Antes do início dos ensaios, as réguas potenciométricas devem ser niveladas com nível de bolha e calibradas com paquímetro (calibração linear entre variação de voltagem e variação de deslocamento) para correta execução dos ensaios.

Em seguida, os extensômetros (*strain gauges* - SG's) são colados ao longo de quatro seções de referência, duas em cada viga (seções S1 e S2 na Viga 1 e seções S3 e S4 na Viga 2, conforme Figura 2.8). Para tanto, as superfícies são lixadas para remover a camada de galvanização e expor o extensômetro em contato direto com o aço, e limpas com álcool isopropílico para remover quaisquer resquícios de fragmentos. Após essa etapa, os extensômetros são colados com cola super resistente, protegidos com fita adesiva contra eventuais danos e, então, seus terminais são soldados em esquema de 3 fios (1/4 de ponte), para diminuir a influência de efeitos de variação de temperatura e de comprimento do fio na medição das deformações.

Os terminais das régua potenciométricas, da célula de carga e dos extensômetros são conectados ao sistema de aquisição nos módulos superior e inferior e, então, inicia-se a aplicação da carga e coleta dos dados pelo software utilizado no sistema DAQ (*Data Acquisition System*). A Figura 2.8 apresenta o croqui do experimento pela perspectiva. Da experiência de ensaios anteriores, a região mais frequente para a primeira falha foi a região de momento fletor negativo M_x , na região com a menor mesa comprimida, situada 34 cm à esquerda da seção S3 instrumentada (círculo vermelho), que se dá exatamente no fim do transpasse da viga 2. Esta seção situada na região de momento negativo, ou seja, de compressão na mesa inferior, constitui-se como a seção de interesse de análise deste trabalho.

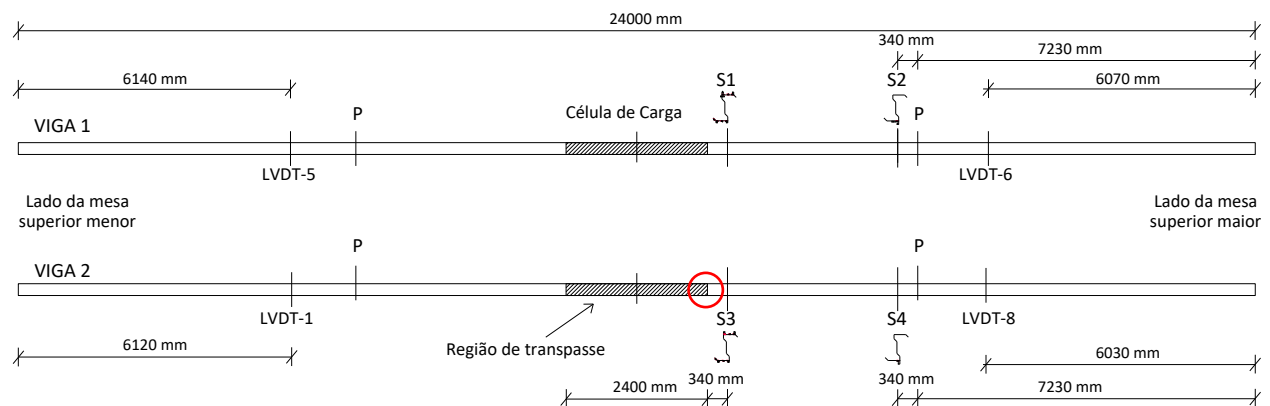


Figura 2.8 - Croqui do *setup* de ensaio. Fonte: os autores.

Do croqui, ressalta-se que o lado direito a partir do apoio central é composto por vigas com a mesa superior de maior largura, enquanto que do transpasse para a esquerda tem-se a terça rotacionada em torno do seu eixo para realização do transpasse, com a mesa superior de menor largura.

2.2 Método da Resistência Direta

A seção do perfil Z de alma enrijecida foi desenhada com suas dimensões nominais de fábrica no software de Faixas Finitas CUFMS. À seção foi atribuído o material aço com módulo de elasticidade $E = 194 \text{ GPa}$ e $G = 75 \text{ GPa}$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$. As condições de contorno foram consideradas como bi-apoiada. Em seguida, foi aplicado um momento unitário em torno do eixo x e a análise elástica de flambagem foi realizada. Com isso, obteve-se a curva de assinatura elástica, que relaciona o comprimento de meia-onda com o fator de carga, o qual, para valores de momento unitários, é igual ao próprio momento de flambagem elástico. O mesmo processo é realizado aplicando-se um momento unitário em torno do eixo y .

Da curva de assinatura elástica, é pertinente para este estudo extrair o valor do momento elástico de flambagem distorcional (M_{dist}), modo de falha este que foi observado durante os ensaios experimentais e por vezes determina o dimensionamento nas tipologias em que esse tipo de perfil é aplicado. O valor de M_{dist} equivale à coordenada vertical do ponto de mínimo para a região de flambagem distorcional da curva de assinatura elástica, que será apresentada no tópico 3.2.

De posse dos valores de M_{dist} em torno dos eixos x e y , é possível encontrar o momento resistente característico para este modo de flambagem através da Equação 2.1 ou Equação 2.2, extraída do Anexo C da ABNT NBR 14762 [1], a depender do valor do parâmetro λ_{dist} expresso na Equação 2.3.

Cálculo de M_{Rdist} :

$$M_{Rdist} = Wf_y, \text{ se } \lambda_{dist} \leq 0,673 \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \left(\frac{Wf_y}{\lambda_{dist}}\right), \text{ se } \lambda_{dist} > 0,673 \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{Wf_y}{M_{dist}}} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde:

W = módulo resistente elástico em torno do eixo em questão, igual a razão entre o momento de inércia em questão e a distância da linha neutra à fibra mais comprimida;

f_y = tensão de escoamento.

2.3 Equação de Interação de Flexão Oblíqua

A equação de interação linear de esforços de projeto na flexão oblíqua composta, para a finalidade de comparação entre resultados experimentais e teóricos, pode ser reescrita, na ausência comprovada de esforços normais (como não foram utilizados furos oblongos durante o ensaio, foi investigada a hipótese de haver esforço normal na terça, entretanto, essa hipótese foi descartada a partir da colagem dos extensômetros, como mostrado na posteriormente na Figura 3.10a), para valores característicos de solicitações e resistências, como na Equação 2.5, a partir da equação de interação para barras submetidas à flexão composta (Equação 2.4). A mesma apresenta-se no item 9.9 da ABNT NBR 14762 [1] para valores de cálculo e é uma estimativa inferior das capacidades sob esforços combinados (interação linear).

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{xSd}}{M_{xRd}} + \frac{M_{ySd}}{M_{yRd}} \leq 1 \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$\frac{M_{xSk}}{M_{xRk}} + \frac{M_{ySk}}{M_{yRk}} \leq 1 \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde:

M_{xSk} = momento solicitante em torno do eixo x e igual à soma de duas parcelas, uma devido ao peso próprio da estrutura, após o fim do posicionamento dos perfis laminados sobre as terças, e outra associado à carga máxima que gera a primeira falha na estrutura, observada experimentalmente;

M_{ySk} = momento solicitante induzido em torno do eixo y e obtido conforma Equação (2.7).

M_{xRk} e M_{yRk} = momentos resistentes característicos em torno dos eixos principais de inércia obtidos analiticamente pelo Método da Resistência Direta.

A partir das condições de contorno do ensaio experimental, pode-se classificá-lo como ensaio de flexão com restrição, onde as restrições representadas pelas correntes rígidas, pelo sistema de aplicação de forças e pelo apoio central impedem deslocamento fora do plano. Para a terça Z mostrada na Figura 2.9b, os deslocamentos (u_x) perpendiculares à alma são impedidos, e a viga responde ao momento M_x sofrendo um deslocamento v no plano da alma. Esse fenômeno pode ser mostrado pela análise elementar de viga, como mostra Trahair [7], em que as restrições que impedem u_x induzem um momento M_y dado pela Equação 2.6:

$$\frac{M_y}{M_x} = -\frac{I_{xy}}{I_x} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Dessa forma, essa equação será utilizada para obtenção do momento solicitante característico em torno do eixo y, como reescrito na Equação 2.7:

$$M_{ySk} = -\frac{I_{xy}}{I_x} \cdot M_{xSk} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Onde:

I_x = momento de inércia em relação ao eixo x;

I_{xy} = produto de inércia em relação aos eixos retangulares x e y perpendiculares e paralelos à alma, respectivamente.

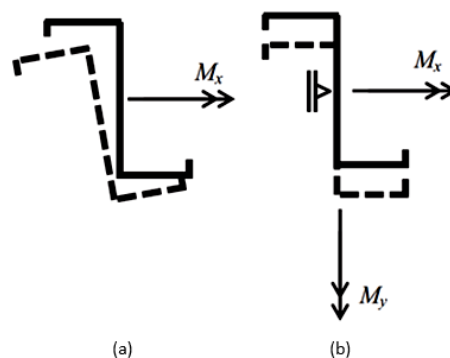


Figura 2.9: (a) Flexão de terça Z sem restrição lateral ($M_y = 0$). (b) Flexão de terça Z com restrição lateral da alma ($u_x = 0$) Fonte: adaptado de Trahair [7]

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados experimentais

O ensaio das terças Z de alma enrijecida de 300 mm de altura e 1,90 mm de espessura começou com o posicionamento dos perfis laminados sobre os quatro pontos das terças (aplicação do peso próprio). O ensaio de peso próprio representa a primeira parcela do carregamento aplicado. Após o encerramento do ensaio de peso próprio do sistema de aplicação, posicionou-se a célula de carga entre o aplicador e as vigas de aplicação, e iniciou-se a segunda etapa. Aplicou-se então uma progressão de carga sobre a longarina, acompanhando-se de perto a ocorrência da primeira falha. Foi percebida a primeira falha por flambagem distorcional (seção de interesse) à direita do fim do transpasse na viga 2, a 340 mm da seção S3, na região de momento negativo (Figura 3.1). Nesse instante, foi anotada a carga correspondente sinalizada pelo programa igual a cerca de 23 kN. Prosseguiu-se com a aplicação de carga até 31,50 kN para visualização das demais falhas no sistema. A falha por flambagem distorcional real do ensaio das terças pode ser visualizada na Figura 3.3. Ao longo de todo o ensaio foram coletados os deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento e as deformações nos extensômetros das quatro seções instrumentadas, bem como o valor de carregamento correspondente.

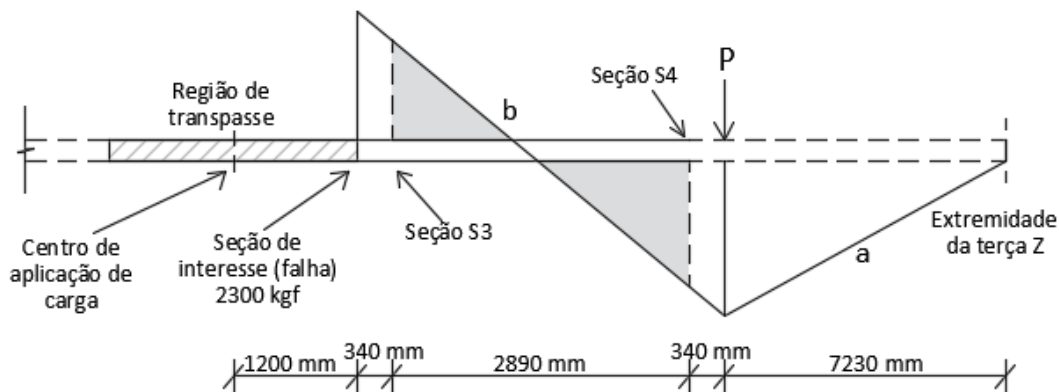


Figura 3.1. Momentos nas seções da viga 2. Fonte: os autores.

Os valores de deformação pertinentes foram extraídos dos extensômetros SG15 (seção S3) e SG13 (seção S4), conforme Figura 3.2, situados próximos da alma e na região tracionada da seção (Figura 3.1), uma vez que as deformações na região comprimida, onde ocorre o fenômeno da flambagem poderiam não ser tão estáveis como na região tracionada.

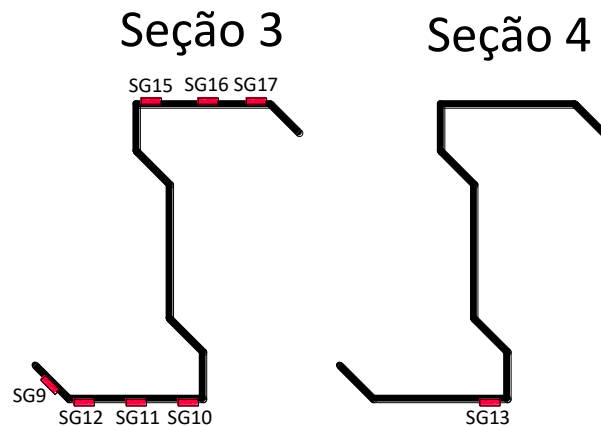


Figura 3.2: Seção S3 e S4 instrumentada com os extensômetros (SG).Fonte: os autores.



Figura 3.3: Falha por flambagem distorcional acontecendo no ensaio das terças. Fonte: os autores.

Multiplicada a deformação pelo módulo de elasticidade de 204 GPa, extraído do ensaio de tração do aço ZAR 400, obteve-se a tensão na seção naquele instante (Equação 3.1). Tal valor, multiplicado pelo módulo resistente elástico W_x em relação à fibra tracionada resulta um momento solicitante na seção (Equação 3.2). As propriedades geométricas da seção estão ilustradas na Figura 3.4, e foram calculadas por meio do software CUFSM, que será abordado no tópico 3.2.

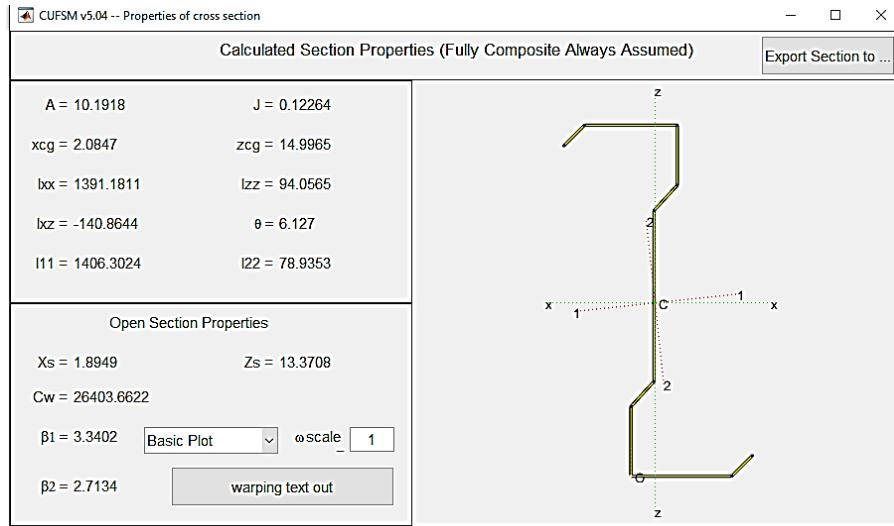


Figura 3.4 – Propriedades geométricas da seção ensaiada obtida pelo software CUFSM. Fonte: os autores.

A partir dos valores de deslocamentos medidos pela régua potenciométrica 1 (LVDT 1), construiu-se o gráfico força aplicada pela célula de carga versus deslocamentos, conforme Figura 3.5. É possível identificar o patamar de falha da peça, atingida a carga de falha 23 kN, onde os deslocamentos são ampliados sem variação de carregamento.

Já a parcela de momento devido ao peso próprio dos perfis laminados foi determinada a partir da deformação encontrada no patamar como representado no gráfico da Figura 3.6, que representa a estabilização das deformações nas terças ao longo tempo com o fim da aplicação do peso próprio. Do mesmo modo que para a carga de ruptura, foram multiplicadas as deformações pelo módulo de elasticidade e em seguida pelo módulo resistente elástico para os eixos x e y.

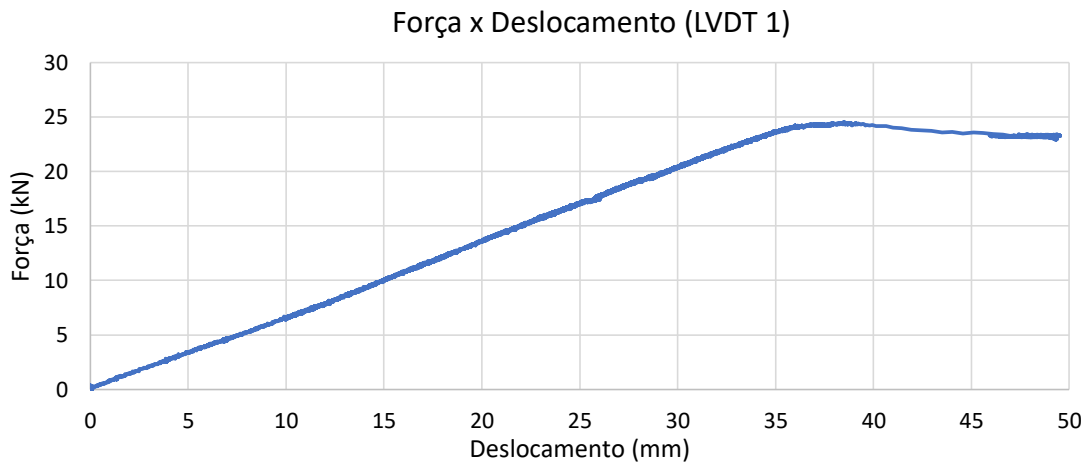


Figura 3.5 – Gráfico Força x Deslocamento no LVDT 1 para aplicação de força pela célula de carga. Fonte: os autores.

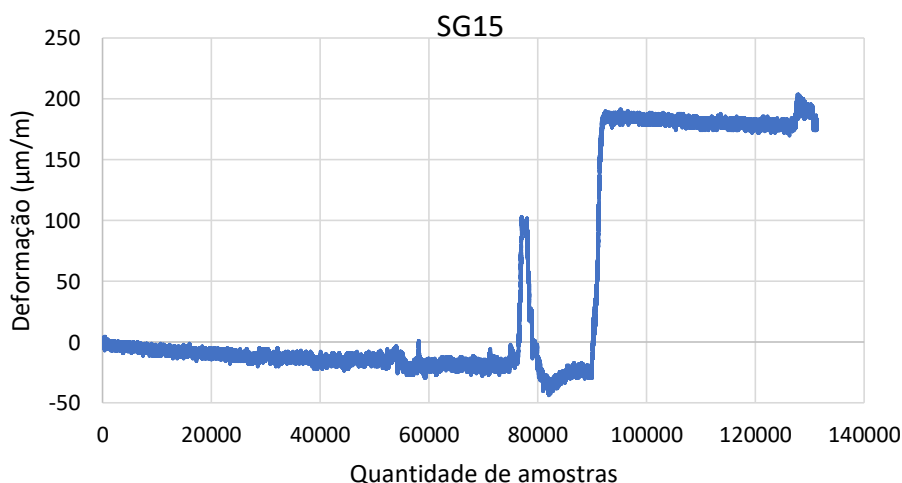


Figura 3.6 – Gráfico Deformação x Quantidade de amostras no extensômetro SG15 para aplicação de peso próprio.
Fonte: os autores.

O módulo resistente elástico foi obtido dividindo-se o momento de inércia, em torno do eixo x ou y, pelo braço de alavanca entre o centroide da seção na direção analisada e a distância entre a fibra (mesa superior ou inferior) que continha o extensômetro analisado. O módulo de elasticidade adotado foi o obtido pelo ensaio de tração de um corpo de prova do material ZAR 400, igual a 204 GPa.

Como a seção que falhava estava no fim do transpasse em que havia uma ligação parafusada, onde o campo de tensões poderia ser complexo, utilizou-se o princípio de Saint Venant para estimar o esforço a partir de seções afastadas. Assim, a partir desses valores, o momento solicitante na seção de interesse foi obtido através de semelhança de triângulos, a partir do conhecimento da inclinação da reta que liga o máximo momento negativo no apoio central ao máximo momento positivo nos pontos de aplicação de carga (reta b da Figura 3.1). Assim, foram obtidas as parcelas de momento para a seção de interesse, conforme dados da Tabela 3.1. A soma das contribuições resultou em um momento de falha em torno de x igual a 16,36 kN.m.

Tabela 3.1: Valores de momento obtidos nas seções de interesse. Fonte: os autores.

Parcela	CG 50t	SG15	SG13	E	σ inf	σ sup	Wx inf	Wx sup	Mx S4	Mx S3	Mx seção falha
	kgf	um/m	um/m	N/m ²	N/m ²	N/m ²	cm ³	cm ³	kN.m	kN.m	kN.m
carga de falha	2300	4,52E+02	5,23E+02	2,04E+11	9,24E+07	1,07E+08	92,77	90,52	8,56	9,67	11,82
peso próprio	1200,00	1,80E+02	2,00E+02	2,04E+11	3,68E+07	4,09E+07			3,41	3,69	4,53
TOTAL									11,98	13,37	16,36

3.2 Resultados via Método da Resistência Direta

A aplicação de momentos fletores unitários em torno dos eixos x e y resultaram nas distribuições de tensão da Figura 3.7. Da curva de assinatura elástica dos eixos x (Figura 3.8) e y (Figura 3.9) foram extraídos os valores de $M_{x_{dist}} = 22,82 \text{ kN.m}$ e $M_{y_{dist}} = 4,35 \text{ kN.m}$. Com estes valores, obtiveram-se os momentos resistentes característicos $M_{x_{Rdist}} = 25,81 \text{ kN.m}$ e $M_{y_{Rdist}} = 3,75 \text{ kN.m}$ como ilustrado na Tabela 3.2.

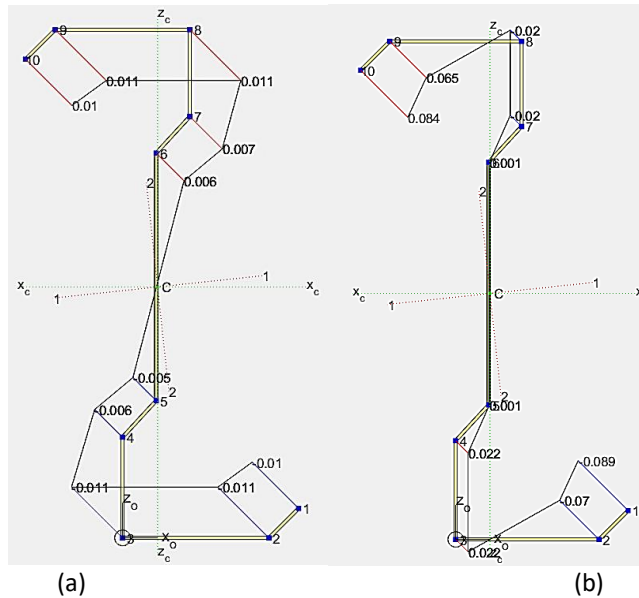


Figura 3.7 – Distribuição de tensões elásticas teóricas devido aos momentos fletores unitários em torno dos eixos x (a) e y (b) isoladamente. Fonte: os autores.

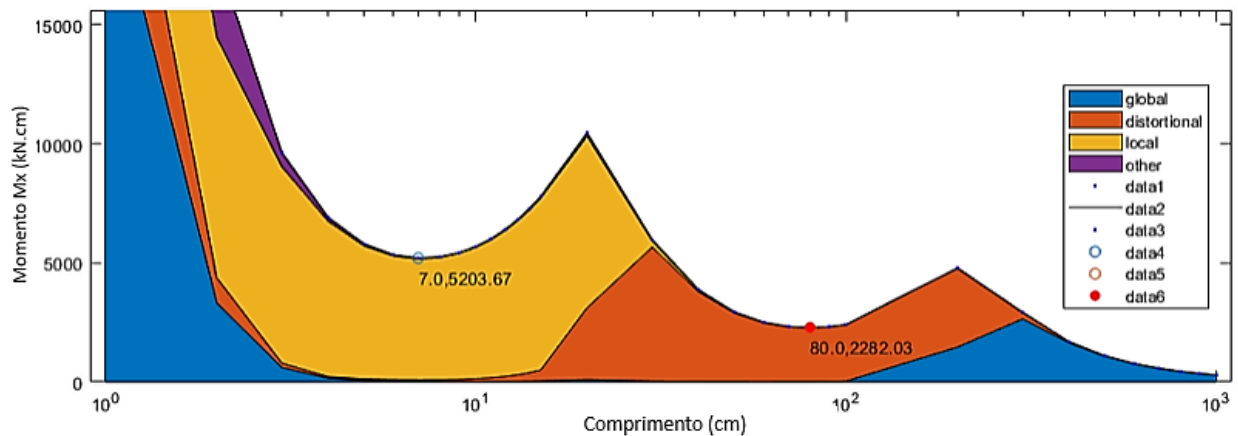


Figura 3.8 – Curva de assinatura elástica do eixo x. Fonte: os autores.

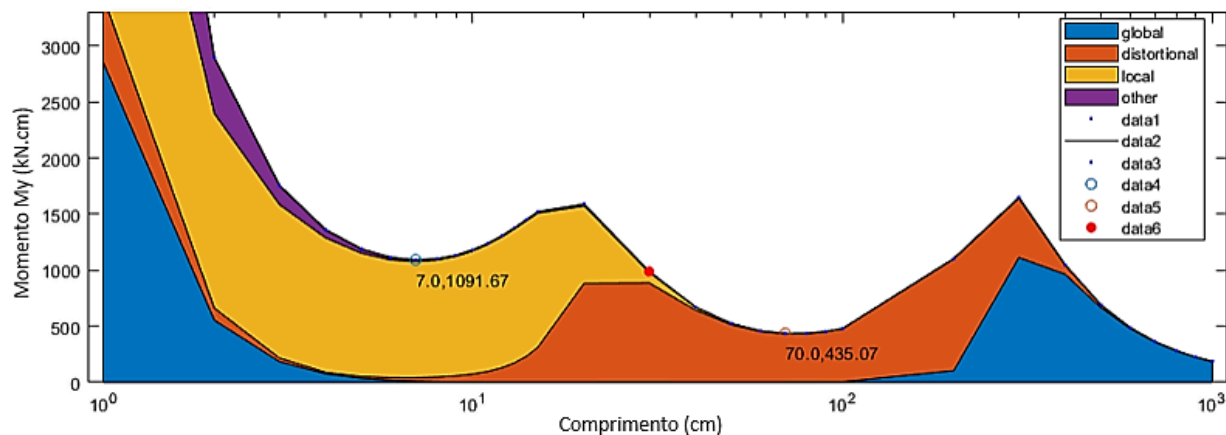


Figura 3.9 – Curva de assinatura elástica do eixo y. Fonte: os autores.

Tabela 3.2: Valores das propriedades geométricas extraídas do CUFSM e momentos resistentes característicos obtidos em torno dos eixos x e y. Fonte: os autores.

Propriedades geométricas da seção em x (CUFSM):			Propriedades geométricas da seção em y (CUFSM):		
I_{xx}	1391,18	cm ⁴	I_{yy}	94,06	cm ⁴
y	15,36	cm	x	8,48	cm
$W_x = I_{xx}/y$	90,55	cm ³	$W_y = I_{yy}/x$	11,09	cm ³
Momento resistente característico em x			Momento resistente característico em y		
f_y	46,00	kN/cm ²	f_y	46,00	kN/cm ²
M_{dist}	2282,03	KN.cm	M_{dist}	435,07	KN.cm
λ_{dist}	1,35	> 0.673	λ_{dist}	1,08	> 0.673
M_{rdist}	2581,04	kN.cm	M_{rdist}	375,50	kN.cm
	25,81	kN.m		3,75	kN.m

3.3 Equação de interação oblíqua

Por fim, aplicam-se as magnitudes de momentos solicitantes e resistentes na equação de interação da flexão oblíqua, Equação (2.5), conforme descrita no tópico 2.3, a qual resultou no valor de 1,07, que representa uma resistência experimental 7% superior à resistência prevista pela norma. Como não foram utilizados furos oblongos durante o ensaio, foi investigada a hipótese de haver esforço normal na terça. Dessa forma, a ausência de esforços normais pôde ser confirmada pela deformação nula medida no extensômetro posicionado na linha neutra ao longo do regime linear, SG 7 da Figura 3.10 (a), em um

ensaio anterior do mesmo perfil, cuja espessura da terça fora de 2,70 mm, com nenhuma outra alteração no setup do ensaio.

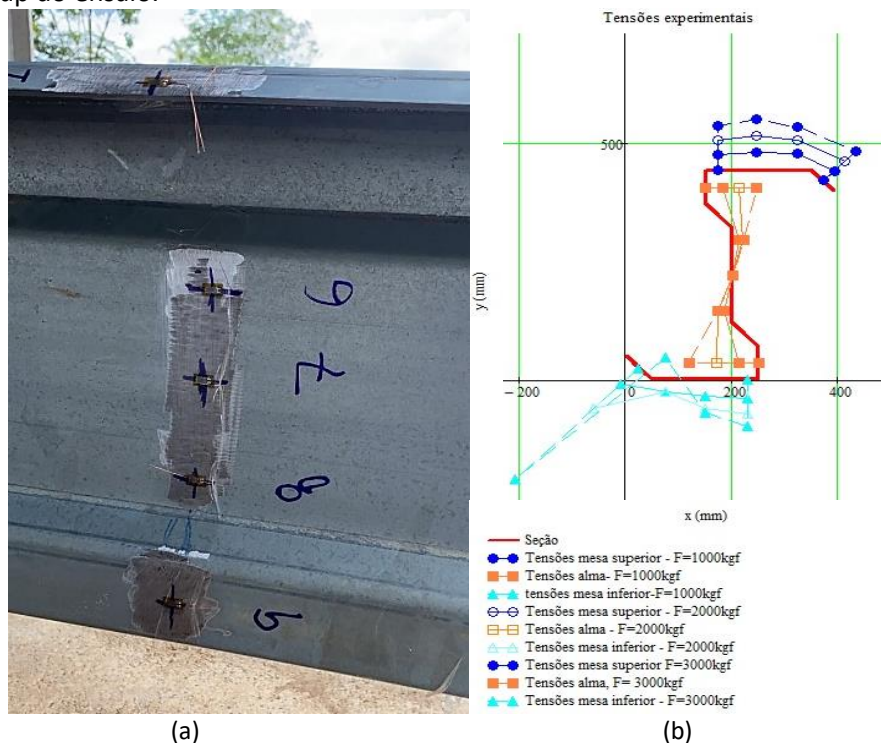


Figura 3.10 – (a) Posicionamento de extensômetros na alma da terça em ensaio realizado anteriormente; (b) Comprovação da ausência de esforço normal a partir da curva em laranja (tensão nula na linha neutra ao longo do regime de carregamento linear). Fonte: os autores.

4 CONCLUSÃO

Com os resultados da metodologia apresentada, foi possível afirmar o impacto da existência do momento fletor em torno do eixo y na resistência geral da terça. Na prática, na utilização de terças em galpões o momento na menor inércia não seria induzido por travamentos laterais e/ou aparatos de ensaio infinitamente rígidos ao longo do comprimento da terça, mas sim pela disposição inclinadas de cobertura de galpões onde a decomposição do peso próprio geraria uma componente em cada um dos eixos principais de inércia.

Além disso, o resultado de 1,07 da equação de interação da flexão oblíqua traduz que o experimento foi realizado, a parte de incertezas e imperfeições geométricas naturais de um ensaio em grande escala, inerente à ensaios experimentais, de maneira muito confiável, onde a peça estrutural resistiu 7% acima do esperado pelo valor característico de norma, o que para o teor desse trabalho é um resultado bastante satisfatório.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. ABNT NBR 14762. 2010. Rio de Janeiro, RJ.
- [2] Silva, J. M. M.; Malite, M. Longitudinally stiffened web purlins under shear and bending moment. Thin-walled structures, v. 148, p. 106616, 2020.
- [3] Kyvelou, P. et al. Moment redistribution in cold-formed steel sleeved and overlapped two-span purlin systems. Advances in Structural Engineering. 2018; v 21, n. 16, p. 2534-2552.
- [4] Chodraui, G. M. de B. Flambagem por distorção da seção transversal em perfis de aço formados a frio submetidos à compressão centrada e à flexão. Dissertação de Mestrado EESC/USP. 2003. São Carlos, SP.
- [5] Silva, E. L. et al. Estruturas compostas por perfis formados a frio: Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762: 2010 e ABNT NBR 6355: 2012. Instituto do Aço Brasil, 2014. Rio de Janeiro, RJ.
- [6] Donim, V. C. Tabelas para Verificação de Perfis Formados a Frio. 2009. Salvador, BA.
- [7] N.S. Trahair. Non-linear biaxial bending of steel Z-beams. Thin-Walled Structures. 2018.