



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Construções leves estruturadas em aço: projeto; dimensionamento; fabricação; e montagem

AUTOMATIZAÇÃO DO CÁLCULO DE TERÇAS EM PERFIS Z FORMADOS A FRIO

Caio Enrique Rust Barreto Cavalcante¹

Vinícius Nogueira Magalhães²

João Victor Fragoso Dias³

Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani⁴

Resumo

A elevada resistência mecânica e a rapidez de execução dos sistemas metálicos impulsionam seu emprego na construção civil. Entre outras vantagens, os perfis de aço formados a frio destacam-se pela sua considerável leveza e por agregarem uma boa relação inércia/peso. Esses perfis são produzidos em espessuras pequenas, devido ao seu processo de fabricação, o que desencadeia uma significativa esbelteza, que pode acarretar modos de instabilidade por flambagem local e distorcional. A ABNT NBR 14762:2010 apresenta três métodos de cálculo para esses perfis, mas sua aplicação prática é limitada pela sua complexidade analítica, tornando recomendável o uso de ferramentas computacionais. Portanto, este trabalho teve como objetivo elaborar uma ferramenta computacional para verificação e dimensionamento de terças em perfis Z enrijecidos, formados a frio, utilizando o Método da Largura Efetiva e o Método da Resistência Direta, implementados na linguagem de programação Python. Os valores obtidos pela ferramenta computacional mostraram-se próximos aos resultados de referência, apresentando um erro médio máximo de 2,2%. Dessa forma, a ferramenta computacional foi considerada validada, confirmando sua precisão e a praticidade de seu uso. Em aplicação prática, observou-se que mais tirantes aumentam a resistência à FLT e que o travamento pela telha pode reduzir o consumo de aço.

Palavras-chave: Perfis Z Formados a Frio; Método da Largura Efetiva; Método da Resistência Direta; Ferramenta computacional.

AUTOMATION OF THE CALCULATION OF PURLINS IN COLD-FORMED Z-SECTIONS

Abstract

The high capacity for mechanical resistance and the speed of execution of steel framing have encouraged their application in the civil construction industry. Among other advantages, the cold-formed steel sections stand out for their considerable lightweight structures, which present great inertia values. These profiles are composed of thin sheets from their manufacturing process, which provides significant local slenderness, triggering failure modes such as local and distortional buckling. In Brazil, ABNT NBR

14762:2010 proposes three procedures to design these channels, however their practical application is limited by analytical complexity, therefore, a computational tool is recommended to solve these problems fast and precisely. Thus, this article aims to develop a technical tool in Python to calculate cold-formed lipped Z-sections, in purlins using the Effective Width Method and the Direct Strength Method. The values obtained from the computational tool were close to the reference results, with a maximum average error of 2.2% compared to the reference. Thereby, the computational tool was considered validated, ensuring its accuracy and practicality for engineering applications. In practical application, it was observed that increasing the number of tie rods improves lateral torsional buckling resistance and the restraining by the sheeting can reduce the amount of steel required.

Keywords: Cold-formed Z-sections; Effective Width Method; Direct Strength Method; Computational tool.

¹ Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

² Graduando em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

³ Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

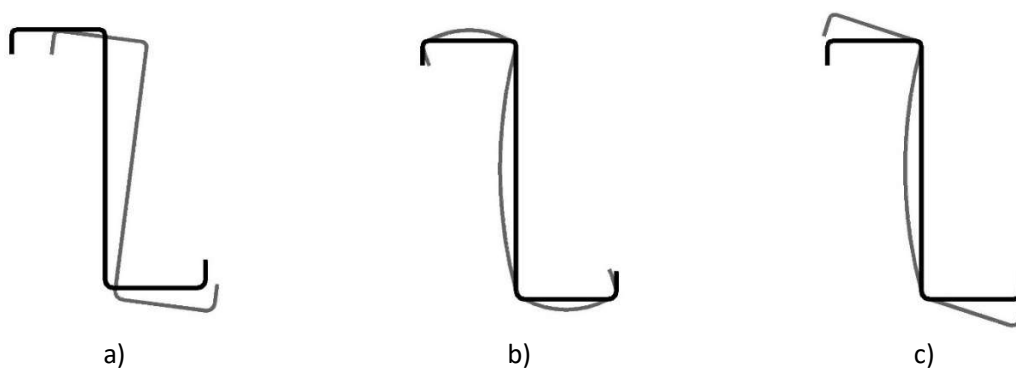
⁴ Engenheira Civil, Doutora em Engenharia de Estruturas, Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória – ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Silva *et al.* [1], aplicações de perfis formados a frio (PFF) têm crescido na construção civil, pois essas seções promovem leveza e resistência mecânica às estruturas nas quais são utilizadas. Como exemplo, podem ser citados galpões de pequeno e médio porte, coberturas, mezaninos, habitações populares e edificações menores. Esses perfis são comumente empregadas como terças, vigas de tapamento, travamentos, montantes e diagonais de treliças. Além disso, apresentam diversas vantagens, podendo-se citar a redução de custos referentes ao seu transporte e manuseio no canteiro de obras, por necessitarem de menor carga de içamento. Conforme afirma Choudrai [2], também proporcionam maior economia em pequenos vãos, quando comparados a perfis laminados ou soldados, devido sua alta relação inércia/peso. Em síntese, propiciam soluções estruturais práticas, rápidas e econômicas.

De acordo com a norma ABNT NBR 6355:2012 [3], PFF são obtidos através do dobramento, em prensa dobradeira, ou pela conformação contínua, em matrizes rotativas, de bobinas laminadas a quente ou a frio. Esse processo viabiliza a produção de peças com diversas configurações de geometria transversal, sendo as seções L, U e Z simples e enrijecidas as mais habituais e essa última, a ênfase deste estudo. Perfis Z enrijecidos a 90 e 45° se destacam por vencer maiores vãos quando comparados a outras seções, tendo em vista a continuidade conferida pelas conexões por sobreposição. No entanto, apesar de o processo de consolidação dessas peças em temperatura ambiente – por isso, “formados a frio” – favorecer incrementos de resistência mecânica, especificamente ao escoamento e à tração, nas regiões de dobra, ele, ao mesmo tempo, reduz a ductilidade e promove o surgimento de tensões residuais [4]. Ademais, posto que são perfis de paredes finas, ou seja, possuem espessura significativamente reduzida em relação à altura ou à largura das chapas, tornam-se mais suscetíveis a modos de instabilidade desencadeados por tensões de compressão, a saber: flambagem global por flexão, torção ou flexo-torção, bem como a local (FL) e a distorcional (FD) [5]. A Figura 1, nesse sentido, ilustra um perfil Z90 e seus possíveis modos de instabilidade.

Figura 1 – Perfis Z90 sujeitos à flambagem – a) global, b) local, c) distorcional.



Fonte: Autoria própria.

Na flambagem global, as seções transversais deslocam-se como um corpo rígido, caracterizando-se pela flexão em relação aos eixos globais da barra. Entende-se por flambagem local a deformação de subelementos da seção transversal de um perfil – alma, mesa ou enrijecedor – com a região de dobra se mantendo não deslocável, funcionando como apoio. Isso ocorre, tendo em vista que as propriedades mecânicas permanecem próximas às do aço virgem nessa zona [4]. Por outro lado, na flambagem distorcional, a mesa e o enrijecedor rotacionam, provocando a flexão da alma e distorção da seção transversal.

Alinhados à norma ABNT NBR 14762:2010 [6], a verificação e o dimensionamento de PFF podem ser realizados por meio de três métodos: Método da Seção Efetiva (MSE), o Método da Largura Efetiva (MLE) e o Método da Resistência Direta (MRD), sendo que este trabalho foca somente nos dois últimos. O MLE consiste na determinação de larguras efetivas, ou reduzidas, dos subelementos da seção transversal, devido à variação de tensões mediante a deformação local. O conceito de larguras reduzidas se baseia na substituição do diagrama não uniforme de tensões, quando o perfil apresenta FL, por um diagrama uniforme de tensões aplicado somente nas larguras efetivas, utilizando o valor de carregamento máximo [1]. Contudo, consoante a Pierin [7], a distribuição de tensões em perfis com instabilidade distorcional não é a mesma dos perfis que apresentam instabilidade local, sendo necessário calcular o esforço resistente à distorção por meio da apuração das forças críticas de FD elástica. Nesse contexto, o MRD apresenta uma abordagem menos complexa quando comparado ao MLE, entretanto, para estimação de esforços resistentes associados à FD, é necessário realizar uma análise de estabilidade elástica, utilizando-se programas como CUFSM [8] ou INSTAB [7].

Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver uma ferramenta computacional para dimensionamento e verificação de perfis Z enrijecidos a 90 e 45° quando empregados como terças de cobertura. Para isso, utilizaram-se o MLE para mensuração dos esforços resistentes axiais de compressão, dos momentos resistentes ao escoamento da seção efetiva e dos momentos resistentes à flambagem lateral com torção (FLT), e o MRD para quantificação dos momentos resistentes à FD das barras. Ademais, o modelo computacional é capaz de calcular os esforços solicitantes impostos na barra, identificando se o perfil escolhido atende aos requisitos de segurança estrutural.

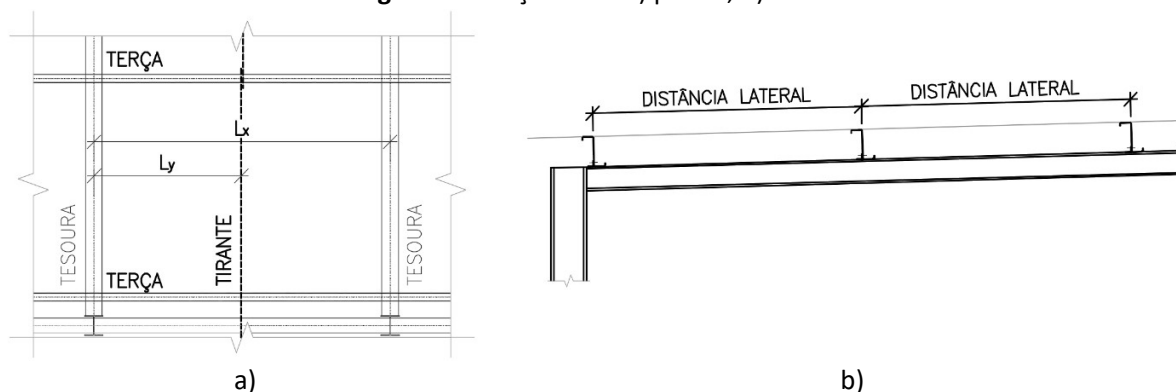
2 MATERIAIS E MÉTODOS

A ferramenta computacional foi desenvolvida em Python e possibilita o cálculo dos esforços solicitantes e das resistências à compressão e à flexão de perfis Z, além de realizar a verificação à flexo-compressão no caso de terças que integram o quadro contraventado da cobertura. As seções, a seguir, explicitam a metodologia e a estratégia adotada na criação do programa.

2.1 Cálculo dos esforços solicitantes

Inicialmente, a ferramenta computacional obtém os esforços solicitantes na terço após requisitar as condições de contorno — restritas a uma viga biapoiada ou a uma viga contínua em dois vãos — e a quantidade de tirantes, podendo haver até três tirantes por vão. Em seguida, o usuário deve fornecer o peso próprio da chapa zincada (telha), a inclinação da cobertura, a distância lateral entre terços, a carga de vento, a carga axial, a quantidade de tirantes entre tesouras, bem como seu diâmetro. Assim, é possível identificar o comprimento destravado no eixo x , L_x , e no eixo y , L_y , calcular o peso por metro dos tirantes e, posteriormente extrair os esforços solicitantes de cálculo nos eixos x e y de trabalho, mediante a inclinação da cobertura. A Figura 2 traz a visualização das terços em planta (a) e em corte (b), exemplificando os parâmetros L_x , L_y e a distância lateral.

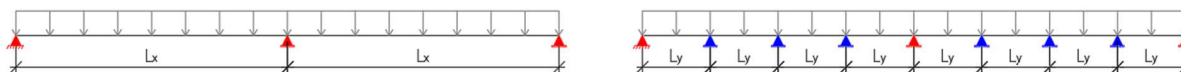
Figura 2 – Terços em – a) planta; b) corte



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3 mostra um modelo estrutural de uma viga contínua de dois vãos, com a inserção de três tirantes entre as tesouras, em que os apoios exibidos em azul correspondem aos tirantes e os em vermelho, às tesouras.

Figura 3 – Modelo estrutural de viga contínua em dois vãos com três tirantes por vão.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Método das Larguras Efetivas

Para sistematizar os procedimentos de dimensionamento presentes na NBR 14762:2010 [6] e a fim de subsidiar a elaboração do modelo computacional, foram elaboradas rotinas de cálculo adaptadas a planilhas em Excel. Para determinar os esforços resistentes pelo MLE, utilizaram-se as Equações 1, 2 e 3 extraídas da norma vigente.

$$N_{c,Rd} = \chi A_{ef} f_y / \gamma \quad (1)$$

$$M_{Rd(ESC)} = W_{ef} f_y / \gamma \quad (2)$$

$$M_{Rd(FLT)} = \chi_{flt} W_{c,ef} f_y / \gamma \quad (3)$$

O parâmetro χ corresponde ao fator de redução da força axial de compressão resistente associado à flambagem global e o parâmetro χ_{flt} ao fator de redução do momento resistente associado à FLT. Os parâmetros A_{ef} , W_{ef} e $W_{c,ef}$ são associados à FL, representando a área efetiva e os módulos elásticos efetivos da seção, capturados através das larguras efetivas dos subelementos da seção. Desse modo, a fim de obter o momento resistente de cálculo, deve-se adotar o menor valor entre o momento resistente de cálculo de início de escoamento, $M_{Rd(ESC)}$, e o momento resistente de cálculo à FLT, $M_{Rd(FLT)}$. Para mensuração da força axial resistente à compressão, $N_{c,Rd}$, o programa utiliza os momentos principais de inércia (I_1 e I_2) de cada seção, enquanto para os momentos fletores, utilizam-se os momentos de inércia (I_x e I_y) e módulos resistentes elásticos (W_x e W_y) referentes aos eixos de trabalho x e y.

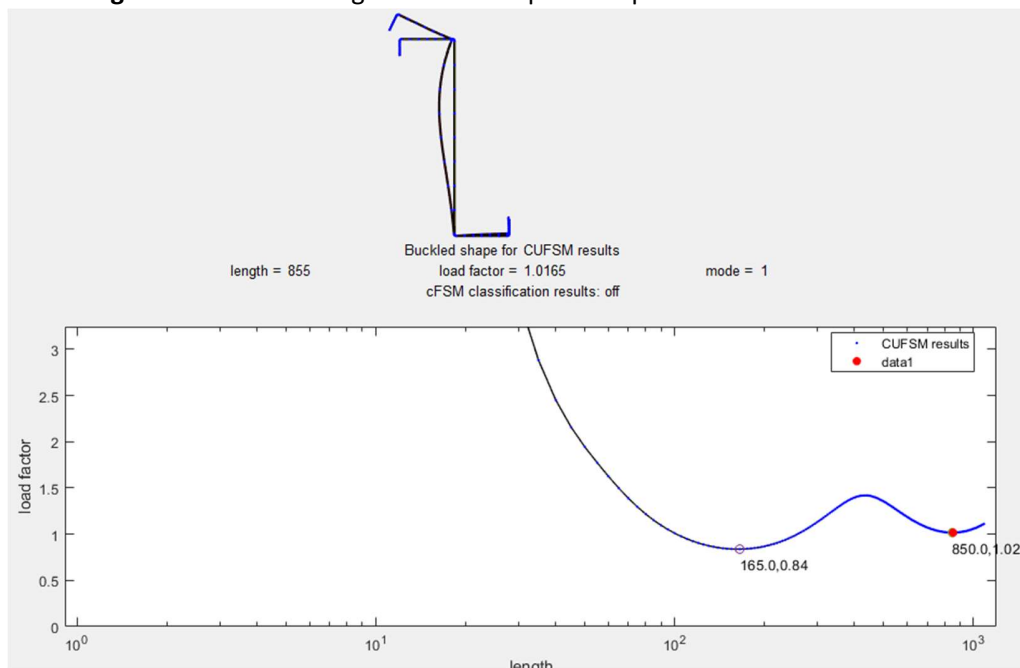
A análise é iniciada pelo enrijecedor comprimido, seguido da mesa comprimida e, por fim, da alma. Cada subelemento possui um código específico para estimativa da sua respectiva largura efetiva, a qual é usada, posteriormente, nas fórmulas da área e do módulo resistente elástico efetivos. Como o MLE é um método iterativo, torna-se necessário reavaliar o perfil ao final de cada rodada, a fim de zerar a diferença entre os eixos baricêntricos da tentativa corrente com a anterior. Desse modo, o programa adotou como critério de parada uma discrepância inferior a 0,1 milímetro e um número máximo de 10 iterações.

2.3 Método da Resistência Direta

Utilizou-se o MRD para identificação dos momentos resistentes à FD com o auxílio do programa CUFSM, o qual utiliza o Método das Faixas Finitas para análise de estabilidade elástica das barras. Primeiramente, é necessário inserir as dimensões do perfil, bem como a tensão de trabalho, f_y , e os comprimentos de meia-onda que serão analisados. Consecutivamente, o CUFSM retorna a curva de assinatura específica do perfil, em que no eixo das abscissas estão os comprimentos (*length*) e no eixo das ordenadas os fatores de carga (*load factor*), sendo essas as tensões de flambagem elásticas adimensionalizadas, segundo

Grigoletti [9]. Para o programa, foram utilizados os fatores de cargas referentes à FD, como expõe a Figura 4, em que está destacada a curva de assinatura de um perfil Z90 300X85X25X2.00.

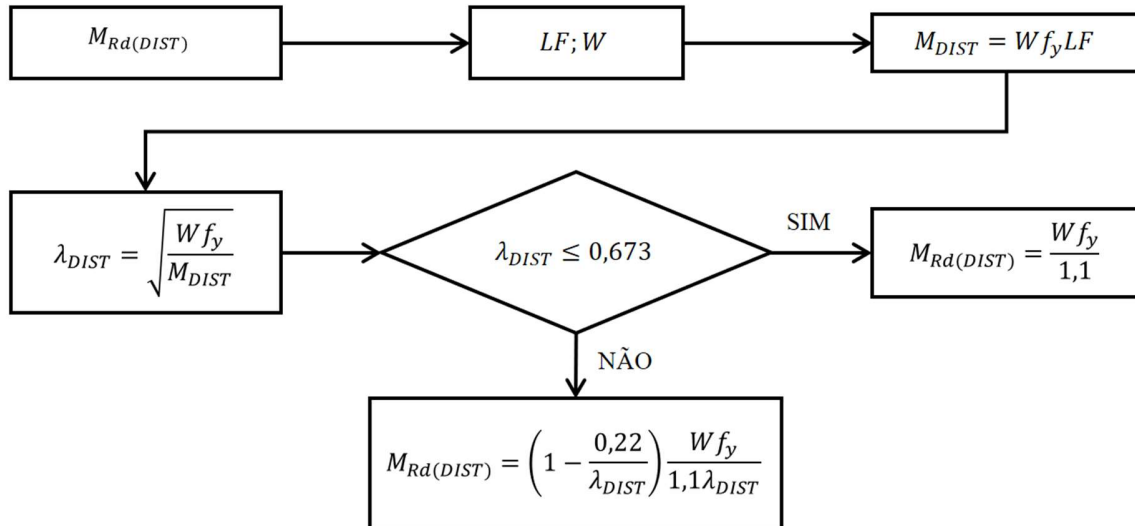
Figura 4 – Fator de carga distorcional para um perfil Z90 300X85X25X2.00.



Fonte: Autoria própria.

Buscou-se discretizar os subelementos em faixas, cujo tamanho proporcionasse uma análise precisa e, ao mesmo tempo, menos custosa computacionalmente. Logo, optou-se por dividir os enrijecedores e as mesas em cinco faixas finitas, a alma em sete faixas e a região de curvatura em três. Já para construção da curva, foram estudados comprimentos de meia-onda múltiplos de 5 mm e limite superior de 1200 mm. Todos os fatores de carga, LF , foram coletados sob uma tensão de trabalho de 300 MPa, módulo de elasticidade igual a 200 GPa e módulo de elasticidade transversal igual a 77 GPa. Eles permitem calcular o momento de FD elástica, M_{DIST} , necessário para mensuração do índice de esbeltez reduzido associado à FD, λ_{DIST} . A Figura 5 demonstra os procedimentos aplicados na determinação do momento resistente de cálculo relativo à FD.

Figura 5 – Fluxograma para momento resistente de cálculo associado à flambagem distorcional.



Fonte: Autoria própria.

Foi desenvolvida uma planilha para apuração do M_{DIST} , a partir do LF , utilizada como arquivo de referência para aquisição do momento resistente à FD pelo programa, sendo utilizado como um parâmetro de entrada da seção, não sendo necessário que o usuário opere o CUFSM.

2.4 Validação dos resultados

Os resultados calculados pela ferramenta computacional desenvolvida foram confrontados com valores de referência obtidos pelo software DimPerfil 4.0, desenvolvido por Silva *et al.* [1]. Para validação dos resultados, foram selecionados 8 perfis Z enrijecidos à 90° e 8 perfis Z enrijecidos à 45° que diferem somente pelo ângulo do enrijecedor. Destaca-se que esse *software* calcula as propriedades geométricas das seções transversais dos perfis, em vez de utilizar os valores padronizados pela ABNT NBR 6355:2012. Portanto, para verificar a ferramenta computacional desenvolvida, foram empregados os mesmos parâmetros dos perfis fornecidos pelo DimPerfil 4.0 e apresentados pelas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis Z90 usados na validação da ferramenta computacional.

Dados	150x60x 20x2,00	150x60x 20x4,75	200x75x 20x2,00	200x75x 30x6,30	250x85x 25x2,00	250x85x 25x4,75	300x85x 25x2,00	300x85x 30x6,30
$A (cm^2)$	5,937	13,241	7,537	23,220	9,137	20,841	10,137	30,780
$b_w (cm)$	15,000	15,000	20,000	20,000	25,000	25,000	30,000	30,000
$b_f (cm)$	6,000	6,000	7,500	7,500	8,500	8,500	8,500	8,500
$D (cm)$	2,000	2,000	2,000	3,000	2,500	2,500	2,500	3,000
$t (cm)$	0,200	0,475	0,200	0,630	0,200	0,475	0,200	0,475
$I_x (cm^4)$	207,211	435,226	466,482	1.332,340	869,629	1.908,621	1.335,767	3.848,046
$W_x (cm^3)$	27,628	58,030	46,648	133,234	69,570	152,690	89,051	256,536
$r_x (cm)$	5,908	5,733	7,867	7,575	9,756	9,570	11,479	11,181
$I_y (cm^4)$	49,832	95,445	89,604	271,188	138,802	283,092	138,806	382,115
$W_y (cm^3)$	8,446	16,563	12,109	37,744	16,524	34,262	16,524	46,685
$r_y (cm)$	2,897	2,685	3,448	3,417	3,898	3,686	3,700	3,523
$J (cm^4)$	0,079	0,992	0,100	3,059	0,122	1,563	0,135	4,060
$C_w (cm^6)$	1.907,440	3.476,046	6.082,509	18.162,851	15.170,613	30.175,258	22.666,972	61.000,868
$r_0 (cm)$	6,580	6,331	8,590	8,310	10,506	10,255	12,061	11,723
$M_{x,DIST} (kNcm)$	1.839,585	11.097,840	1.876,003	28.882,688	2.452,610	15.425,154	2.722,021	36.405,233
$M_{y,DIST} (kNcm)$	605,528	3.633,559	574,448	9.318,805	698,423	4.232,672	1.367,226	8.782,168

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Propriedades geométricas dos perfis Z45 usados na validação da ferramenta computacional.

Dados	150x60x 20x2,00	150x60x 20x4,75	200x75x 20x2,00	200x75x 30x6,30	250x85x 25x2,00	250x85x 25x4,75	300x85x 25x2,00	300x85x 30x6,30
$A (cm^2)$	6,172	14,566	7,772	25,550	9,372	22,166	10,372	33,110
$b_w (cm)$	15,000	15,000	20,000	20,000	25,000	25,000	30,000	30,000
$b_f (cm)$	6,000	6,000	7,500	7,500	8,500	8,500	8,500	8,500
$D (cm)$	2,000	2,000	2,000	3,000	2,500	2,500	2,500	3,000
$t (cm)$	0,200	0,475	0,200	0,630	0,200	0,475	0,200	0,630
$I_x (cm^4)$	222,803	511,302	493,307	1.575,104	913,283	2.124,759	1.397,154	4.389,256
$W_x (cm^3)$	29,707	68,174	49,331	157,510	73,063	169,981	93,144	292,617
$r_x (cm)$	6,008	5,925	7,967	7,852	9,872	9,791	11,606	11,514
$I_y (cm^4)$	64,149	148,813	110,076	430,921	169,477	398,567	169,480	582,812
$W_y (cm^3)$	8,892	21,445	12,632	47,926	16,834	40,700	16,834	58,332
$r_y (cm)$	3,224	3,196	3,763	4,107	4,252	4,240	4,042	4,195
$J (cm^4)$	0,080	1,013	0,101	3,126	0,122	1,585	0,136	4,126
$C_w (cm^6)$	2.156,879	4.214,508	6.681,344	22.666,807	16.813,913	34.870,763	25.218,838	74.256,288
$r_0 (cm)$	6,819	6,732	8,811	8,861	10,749	10,669	12,290	12,254
$M_{x,DIST} (kNcm)$	1.137,429	7.957,889	1.269,200	18.846,618	1.620,346	11.139,296	1.847,829	27.093,828
$M_{y,DIST} (kNcm)$	402,303	2.815,552	397,366	6.814,980	467,530	3.187,892	445,869	6.696,591

Fonte: Autoria própria.

Todos os resultados gerados pelo DimPerfil 4.0 e pela ferramenta computacional foram submetidos a uma tensão de trabalho igual a 300 MPa, comprimento destravado de 300 cm nos três eixos e um fator de modificação de momento fletor igual a 1. Os perfis foram escolhidos a partir da altura de 150 mm, com o intuito de avaliar os casos com maiores esbeltezes. Outrossim, investigou-se a influência da espessura, posto que para cada grupo de altura, selecionaram-se a menor e maior espessura existente no programa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Interface do modelo computacional

A partir da consolidação dos códigos desenvolvidos, foi criada uma interface interativa que permite ao usuário modificar rapidamente todos os parâmetros da terça. A interface apresenta os valores dos esforços resistentes e os compara diretamente aos esforços solicitantes calculados, indicando se o perfil analisado atende ou não aos critérios de segurança estrutural. É possível também verificar, simultaneamente, todos os perfis Z90 e Z45 cadastrados, ou realizar a análise individualizada de um perfil específico. Caso esse não atinja a segurança estrutural, o modelo computacional indicará o próximo perfil com o esforço resistente superior ao solicitante.

A Figura 6 apresenta a aba lateral da interface, em que o usuário deve inserir os dados de entrada do perfil, bem como a resistência ao escoamento do aço, f_y , a distância entre tesouras, L_x , o afastamento lateral entre terças, a inclinação da cobertura, a quantidade e o diâmetro dos tirantes, o peso próprio da telha, o carregamento do vento por metro quadrado de área da cobertura, a força axial solicitante de cálculo (no caso de terça de contraventamento) e o modelo estrutural a ser adotado, podendo ser viga biapoiada ou contínua em dois vãos. O modelo computacional fornece automaticamente o coeficiente de modificação do diagrama de momento fletor, C_b , conforme o tipo de análise selecionada. Alguns projetistas consideram as telhas como travamento para a mesa superior das terças, dispensando, nesses casos, a verificação à flambagem lateral com torção (FLT) quando o momento solicitante é positivo [10]. Ademais, segundo Fakury [11], quando esses elementos são incorporados ao sistema de contraventamento da cobertura, passam a ser solicitados por esforços axiais. A ferramenta traz ao usuário a opção de definir ou não a telha como travamento da terça.

Figura 6 – Aba lateral dividida em - a) parâmetros de entrada, b) modelo estrutural, c) carregamentos e seleção de perfis.

Parâmetros de Entrada

Estrutura e Geometria

Tensão de escoamento (f_y , kN/cm²)

30,00

Dist. entre tesouras (L_x , cm)

600,00

Dist. entre terças (cm)

250,00

Inclinação da cobertura (°)

10

0 45

Modelo Estrutural

Modelo de viga

Viga bi-apoiada Viga contínua

Para viga contínua foram considerados 2 vãos

Coefficiente C_1 (Automático)

1.136

Nº de linhas de tirantes por vão

1

Diâmetro dos tirantes (mm)

10,00

A telha funciona como travamento?

Sim Não

A terça faz parte do quadro contraventado?

Sim Não

Carregamentos

Peso próprio da telha (kg/m²)

-6,00

Carga de vento (kN/m²)

0,59

Esforço axial de cálculo (N_{ed} , kN)

40,00

É necessário inserir valores positivos para esforços com sentido para cima, e negativos para os esforços com sentido para baixo.

Seleção de Perfis para Análise

Selecione o tipo de perfil

Z90 Z45

Escolha os perfis a serem analisados

Analisar todos os Z90

Analisar Perfis

Fonte: Autoria própria.

Inseridos os parâmetros de entrada e os perfis desejados, os elementos analisados aparecerão na aba central da interface, bem como a opção de visualização dos parâmetros de todas as seções cadastradas. Para este estudo, cadastraram-se apenas os 8 perfis Z90 e os 8 perfis Z45, a fim de validar a interface criada. A versão final do programa contará com todas as seções presentes na norma NBR 6355 [3]. A Figura 7 ilustra a aba central da interface, com a opção de visualização das propriedades dos perfis disponíveis, e traz os resultados de todos os perfis Z90 para as condições exemplificadas na Figura 6.

Figura 7 – Aba central demonstrando a simulação de uso da interface.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 8 expõe a funcionalidade da interface ao apresentar a possibilidade de realizar a análise isolada de um perfil, exemplificada pelo perfil Z90 (150x60x20x2,00), com a exibição dos resultados correspondentes tanto para esse perfil quanto para o perfil subsequente que atende às verificações estruturais, sob as mesmas condições adotadas na Figura 6.

Figura 8 – Simulação de análise de um perfil isolado na – a) aba lateral, b) aba central.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Resultados da ferramenta computacional

3.2.1 Validação dos esforços resistentes

Para as seções de perfis Z90 listadas na Tabela 1, foram calculados os momentos fletores e forças de compressão resistentes de cálculo, por meio do programa e os resultados estão apresentados na Tabela

3. A Tabela 4 apresenta as respostas obtidas com o *software* DimPerfil 4.0. A Tabela 5 compara os resultados obtidos por ambos os programas, incluindo a diferença percentual calculada conforme a Equação 4, além da média aritmética dos erros e o desvio padrão amostral. Diferenças percentuais inferiores a 0,1% não são discutidas nesse trabalho por representarem variações irrisórias.

$$Diferença = 1 - DimPerfil/Ferramenta (4)$$

Tabela 3 - Resultados dos perfis Z90 extraídos da ferramenta computacional desenvolvida.

PERFIL Z90	RESULTADOS - MODELO COMPUTACIONAL						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	753,496	328,953	753,496	230,348	230,348	230,348	30,660
150×60×20×4,75	1582,639	812,425	1582,639	451,721	451,721	451,721	59,381
200×75×20×2,00	964,374	752,391	1097,080	263,769	263,769	300,389	50,286
200×75×30×6,30	3633,655	2573,609	3633,655	1029,372	1029,372	1029,372	172,770
250×85×25×2,00	1355,479	1124,499	1566,288	385,632	385,632	395,232	71,160
250×85×25×4,75	4164,263	2933,053	4164,263	934,425	934,425	934,425	193,987
300×85×25×2,00	1571,663	1328,618	1907,104	386,934	386,934	450,668	71,072
300×85×25×6,30	6996,448	4940,536	6996,448	1261,280	1261,280	1273,223	277,717

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Resultados dos perfis Z90 extraídos do DimPerfil 4.0.

PERFIL Z90	RESULTADOS - DIMPERFIL 4.0						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	753,500	328,950	753,500	230,350	230,350	230,350	30,660
150×60×20×4,75	1582,640	812,430	1582,640	451,720	451,720	451,720	59,380
200×75×20×2,00	991,820	752,390	1112,520	264,800	264,800	330,230	50,290
200×75×30×6,30	3633,650	2573,610	3633,650	1029,370	1029,370	1029,370	172,770
250×85×25×2,00	1383,940	1135,060	N.C.	394,770	394,770	N.C.	71,160
250×85×25×4,75	4164,260	2933,050	4164,260	934,430	934,430	934,430	193,990
300×85×25×2,00	1606,847	1321,083	1933,760	395,984	395,984	450,670	71,072
300×85×25×6,30	6996,448	4940,536	6996,450	1273,223	1273,223	1273,220	283,126

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Comparação entre os programas computacionais para perfis Z90.

PERFIL Z90	COMPARAÇÃO						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	-0,0005%	0,0009%	-0,0005%	-0,0010%	-0,0010%	-0,0009%	0,0007%
150×60×20×4,75	-0,0001%	-0,0006%	-0,0001%	0,0003%	0,0003%	0,0002%	0,0015%
200×75×20×2,00	-1,4996%	0,0002%	-1,4074%	-0,3907%	-0,3907%	-9,9341%	-0,0070%
200×75×30×6,30	0,0001%	0,0000%	0,0001%	0,0002%	0,0002%	0,0002%	-0,0001%
250×85×25×2,00	-0,7403%	-0,3155%	N.C.	-2,3697%	-2,3697%	N.C.	-0,0005%
250×85×25×4,75	0,0001%	0,0001%	0,0001%	-0,0005%	-0,0005%	-0,0005%	-0,0013%
300×85×25×2,00	-1,0360%	0,8851%	-1,3977%	-2,3389%	-2,3389%	-0,0004%	0,0000%
300×85×25×6,30	0,0000%	0,0000%	0,0000%	-0,9469%	-0,9469%	0,0002%	-1,9477%
Média Aritmética	-0,4095%	0,0713%	-0,4008%	-0,7559%	-0,7559%	-1,4193%	-0,2443%
Desvio Padrão	0,0060	0,0035	0,0068	0,0104	0,0104	0,0375	0,0069

Fonte: Autoria própria.

Os resultados menores que 0 presentes na Tabela 5 representam uma diferença negativa entre os valores encontrados pelo DimPerfil 4.0 e os calculados pela ferramenta computacional. Nota-se, portanto, que, nesses casos, a ferramenta quantificou resistências menores que o DimPerfil 4.0. Em contrapartida, os resultados positivos indicam os casos em que a resistência pelo programa implementado foi maior. Destaca-se que a maior divergência encontrada ocorreu no momento resistente à FD em torno do eixo y do perfil Z90 200×75×20×2,00. Ademais, não constam valores de momentos resistentes à FD para o perfil 250×85×25×2,00 no programa de referência.

Similarmente, a Tabela 6 expõe os resultados obtidos pelo programa computacional desenvolvido para perfis Z45. A Tabela 7 informa os resultados extraídos do *software* DimPerfil 4.0. Por fim, a Tabela 8 traz a comparação entre a ferramenta desenvolvida e a de referência.

Tabela 6 - Resultados dos perfis Z45 extraídos da ferramenta computacional desenvolvida.

PERFIL Z45	RESULTADOS - MODELO COMPUTACIONAL						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	781,317	394,150	687,807	239,194	239,194	217,353	36,439
150×60×20×4,75	1859,278	1068,823	1859,278	565,514	565,514	584,869	77,965
200×75×20×2,00	988,376	825,193	992,085	288,671	288,671	273,300	57,951
200×75×30×6,30	4295,738	3268,076	4295,739	1262,841	1262,841	1307,083	231,571
250×85×25×2,00	1347,804	1139,789	1389,176	389,567	389,567	348,226	81,071
250×85×25×4,75	4635,837	3488,744	4623,813	1083,722	1083,722	1110,005	242,912
300×85×25×2,00	1548,059	1324,665	1696,173	391,549	391,549	342,211	81,511
300×85×25×6,30	7980,465	6117,174	7980,464	1542,246	1542,246	1590,869	375,069

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Resultados dos perfis Z45 extraídos do DimPerfil 4.0.

PERFIL Z45	RESULTADOS - DIMPERFIL 4.0						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	779,520	394,150	695,260	242,509	242,509	220,280	36,430
150×60×20×4,75	1859,280	1068,820	1859,280	584,869	584,869	584,870	77,970
200×75×20×2,00	997,590	822,890	1001,140	289,365	294,440	277,330	57,950
200×75×30×6,30	4295,740	3268,080	4295,740	1307,083	1307,083	1307,080	231,560
250×85×25×2,00	1352,430	1139,990	1401,050	390,849	393,586	353,280	81,070
250×85×25×4,75	4635,840	3488,740	4635,840	1110,000	1110,000	1110,000	242,920
300×85×25×2,00	1563,756	1315,410	1709,730	389,656	395,619	347,330	81,510
300×85×25×6,30	7980,465	6117,170	7980,460	1590,869	1590,869	1590,870	375,070

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Comparação entre os programas computacionais para perfis Z45.

PERFIL Z45	COMPARAÇÃO						
	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Rd}$ (kNcm)
150×60×20×2,00	0,2300%	0,0000%	-1,0836%	1,3670%	1,3670%	-1,3467%	0,0247%
150×60×20×4,75	0,0001%	0,0003%	-0,0001%	3,3093%	3,3093%	-0,0002%	0,0064%
200×75×20×2,00	0,9236%	0,2791%	-0,9127%	0,2398%	1,9593%	-1,4746%	0,0017%
200×75×30×6,30	0,0000%	0,0001%	0,0000%	3,3848%	3,3848%	0,0002%	0,0048%
250×85×25×2,00	0,3421%	0,0176%	-0,8548%	0,3280%	1,0211%	-1,4514%	0,0012%
250×85×25×4,75	0,0001%	0,0001%	-0,2601%	2,3674%	2,3674%	0,0005%	0,0033%
300×85×25×2,00	1,0038%	-0,6987%	-0,7993%	0,4835%	1,0288%	-1,4959%	0,0012%
300×85×30×6,30	0,0000%	0,0001%	0,0001%	3,0564%	3,0564%	-0,0001%	0,0003%
Média Aritmética	0,3125%	-0,0502%	-0,4888%	1,8170%	2,1868%	-0,7210%	0,0055%
Desvio Padrão	0,0042	0,0028	0,0047	0,0137	0,0099	0,0077	0,0001

Fonte: Autoria própria.

Observa-se um aumento notável na quantidade de divergências para os perfis Z45 em comparação aos perfis Z90, diferença essa atribuída à maior complexidade geométrica da seção, uma vez que o enrijecedor está inclinado a um ângulo de 45°, o que torna as formulações das larguras efetivas mais desafiadoras do ponto de vista analítico. Entretanto, embora os perfis Z45 apresentem, para a maioria dos esforços resistentes, diferenças médias percentuais mais altas, os desvios padrões observados são menores. Além disso, por se tratar de um método iterativo, e considerando a complexidade na determinação analítica das larguras efetivas para ambas as seções, pequenas discrepâncias iniciais podem ser propagadas ao longo da rotina computacional, resultando em diferenças mais expressivas nos valores finais. Seguindo a mesma lógica, as divergências percentuais mais significativas, quando comparados perfis de mesma altura, ocorreram naqueles com maior esbeltez, os quais tiveram as larguras dos subelementos reduzidas.

Para os perfis de altura d igual a 150 mm e 250 mm, foi realizada uma análise paramétrica, mantendo-se constantes os demais parâmetros geométricos e variando-se apenas a espessura de 2,00 mm para 4,75 mm. Nesse contexto, a Tabela 9 apresenta o aumento percentual da resistência de cálculo decorrente do incremento de rigidez na seção transversal.

Tabela 9 - Impacto do aumento de espessura nas resistências de cálculo.

Esforços resistentes	Ferramenta computacional				DimPerfil 4.0			
	Z45		Z90		Z45		Z90	
	150	250	150	250	150	250	150	250
$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	138%	244%	110%	203%	139%	243%	110%	201%
$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	171%	206%	147%	159%	171%	206%	147%	158%
$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	170%	233%	110%	166%	167%	231%	110%	N.C.
$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	136%	178%	96%	142%	141%	184%	96%	137%
$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	136%	178%	96%	142%	141%	182%	96%	137%
$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	169%	219%	96%	136%	166%	214%	96%	N.C.
$N_{c,Rd}$ (kNcm)	114%	200%	94%	173%	114%	200%	94%	173%

Fonte: Autoria própria.

Para os dois perfis, evidencia-se um aumento significativo de resistência ao se alterar somente a espessura. Convém salientar que o aumento nas resistências não se comporta de maneira linear ao aumento da espessura (igual a 138%) para as duas alturas.

3.2.2 Exemplo de dimensionamento

Com a finalidade de simular uma real situação de dimensionamento e verificação de terças de cobertura, variando a quantidades de tirantes por seção e realizando a análise por viga biapoiada e viga contínua em dois vãos, foram inseridos na interface os dados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de entrada na interface para exemplo de dimensionamento

Dados de entrada na interface	
Tensão de escoamento	300,00 MPa
Afastamento entre terças	2,50 m
Distância entre tesouras	6,00 m
Inclinação da cobertura	10,00 °
Diâmetro dos tirantes	10,00 mm
Peso próprio da telha	-6,00 kg/m ²
Carga de vento	0,63 kN/m ²
Esforço axial de cálculo	30,00 kN

Fonte: Autoria própria.

Para a análise, a terça foi considerada como parte do sistema de contraventamento da cobertura, assumindo-se que as telhas não fornecem travamento lateral à mesa superior do perfil. Adotou-se o elemento Z45 200x75x20x2.00 para essa verificação e os resultados estão presentes na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados gerados pela interface para o perfil Z45 200x75x20x2.00.

VIGA BIAPOIADA 1 TIRANTE POR VÃO										
$M_{x,Sd}$ (kNcm)	$M_{y,Sd}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Sd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	Verificação
-892,48	23,81	988,38	887,78	992,09	288,67	288,67	273,30	30,00	57,95	Não Passa
VIGA CONTÍNUA 1 TIRANTE POR VÃO										
$M_{x,Sd}$ (kNcm)	$M_{y,Sd}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Sd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	Verificação
892,48	20,41	988,38	858,51	992,09	288,67	288,67	273,30	30,00	57,95	Não Passa
VIGA CONTÍNUA 2 TIRANTES POR VÃO										
$M_{x,Sd}$ (kNcm)	$M_{y,Sd}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Sd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	Verificação
892,48	8,96	988,38	963,67	992,09	288,67	288,67	273,30	30,00	95,05	Passa
VIGA CONTÍNUA 3 TIRANTES POR VÃO										
$M_{x,Sd}$ (kNcm)	$M_{y,Sd}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{x,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(ESC)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(FLT)}$ (kNcm)	$M_{y,Rd(DIST)}$ (kNcm)	$N_{c,Sd}$ (kN)	$N_{c,Rd}$ (kN)	Verificação
892,48	5,03	988,38	988,38	992,09	288,67	288,67	273,30	30,00	103,55	Passa

Fonte: Autoria própria.

As células em vermelho indicam esforços resistentes inferiores aos solicitantes. A medida em que se adicionam tirantes, o comprimento destravado em torno do eixo y (L_y) diminui, aumentando o momento crítico à FLT e, conseqüentemente, a resistência correspondente a esse estado limite último. Além disso, ocorre uma diminuição do momento solicitante na menor inércia ($M_{y,Sd}$), e há uma inversão de sinal de $M_{x,Sd}$ entre as análises. Na configuração de viga biapoiada, o momento solicitante de cálculo em torno da maior inércia assume valor negativo no meio do vão, comprimindo a mesa inferior da terça. Assim, mesmo que o projetista considere a telha como elemento de travamento da mesa superior, a verificação da flambagem lateral por torção continua sendo necessária. Já na análise como viga contínua, o momento solicitante de cálculo torna-se positivo nesse mesmo eixo, concentrando-se sobre o apoio interno (tesoura) e comprimindo a mesa superior da terça. Neste cenário, a carga distribuída de cálculo atuou no sentido antigravitacional, o que influencia diretamente nas considerações de análise. Caso sua direção fosse descendente, as observações feitas anteriormente seriam invertidas. Ressalta-se que, nos casos em que a verificação estrutural não foi atendida, viga biapoiada e viga contínua com um tirante, a ferramenta computacional identifica automaticamente o próximo perfil disponível que satisfaz os critérios de dimensionamento. No caso deste exemplo, este perfil foi o Z45 200x75x30x6,30.

Na análise de uma terça biapoiada, caso a telha seja considerada como elemento de travamento lateral da mesa superior da terça, a interface deixa de exibir os momentos resistentes à flambagem lateral por torção (FLT), o que pode levar à adoção de perfis de menor peso. Da mesma forma, se a terça não for

considerada como parte do sistema de contraventamento, os esforços axiais também não são apresentados e o dimensionamento realizado considera apenas a flexão oblíqua.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho uma ferramenta computacional é desenvolvida para o dimensionamento e verificação de perfis Z enrijecidos a 90 e 45° aplicando o MLE e o MRD. A validação da ferramenta computacional foi realizada por meio da comparação dos esforços resistentes obtidos pela ferramenta computacional com os obtidos pelo software DimPerfil 4.0. Para o MLE, as diferenças mais notáveis entre os programas ocorreram nos perfis que tiveram as larguras dos subelementos reduzidas. Essas variações podem ser atribuídas à complexidade analítica do método por sua natureza iterativa que, conseqüentemente, propaga erros de aproximação na rotina de cálculo. Para o MRD, as diferenças entre os programas podem ser atribuídas a eventuais discrepâncias entre os fatores de carga, e logo, momentos de FD elástica, extraídos dos programas que realizam a análise elástica das barras, bem como erros de aproximação.

Dessa forma, o programa implementado apresentou valores satisfatórios frente aos de referência e pode ser considerada validado, já que os desvios padrão foram pequenos e a máxima diferença percentual média foi de 2,2%, considerando ambos os perfis Z90 e Z45. Sendo assim, o modelo computacional é capaz de calcular, por meio do MLE, o esforço axial de compressão, os momentos resistentes ao escoamento da seção efetiva e à flambagem lateral com torção, bem como o momento resistente à flambagem distorcional, utilizando o MRD.

Foi feita uma simulação de verificação e dimensionamento de terças de cobertura, realizando a análise como viga biapoiada e viga contínua em dois vãos, variando a quantidade de tirantes. Os resultados demonstraram que o aumento do número de tirantes melhora a resistência à flambagem lateral com torção consideravelmente, como era de se esperar. A adoção da hipótese de travamento da mesa superior pela telha permite desconsiderar a verificação à FLT sob momento positivo, possibilitando empregar perfis menores. No entanto, essa simplificação não isenta a necessidade de verificar a mesa inferior quando submetida a momento negativo. No exemplo analisado, o momento solicitante de cálculo máximo em torno de x é negativo na análise como viga biapoiada, e positivo quando considerada como viga contínua. Os momentos solicitantes de cálculo em torno de y são positivos, havendo a redução do seu valor ao passo que tirantes são adicionados. Nos casos em que os perfis inicialmente avaliados não atendiam aos critérios de segurança, a interface indicava automaticamente os próximos perfis cadastrados que satisfaziam às verificações exigidas.

Constatou-se um considerável aumento da resistência para perfis de mesmas dimensões, variando apenas sua espessura. Percebe-se que o aumento de resistência não é linearmente proporcional ao aumento de espessura. Por fim, ressalta-se que, a ferramenta serve de auxílio no dimensionamento de terças, porém uma análise estrutural minuciosa da interação das terças com outros elementos estruturais é necessária para garantir a segurança da edificação.



Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e à FAPES pelo apoio financeiro concedido durante o desenvolvimento deste estudo. A quarta autora agradece à FAPES pela concessão da bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Silva EL, Pierin I, Silva VP. Manual de construção em aço: 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. Rio de Janeiro, 2014.
- 2 Choudrai GM de B. Análise teórica e experimental de perfis de aço formados a frio submetidos a compressão [tese]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 2006.
- 3 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Perfis de aço formados a frio: Padronização. ABNT NBR 6355. Rio de Janeiro: ABNT; 2012.
- 4 Javaroni CE. Perfis de aço formados a frio submetidos à flexão: análise teórico-experimental [tese]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 1999.
- 5 Gomes DM, Cunha Sarmanho AM, Teixeira de Souza F. Análise numérica de pilares formados a frio do tipo rack com perfurações de bordas enrijecidas. REEC. 2023 [acesso em 15 de maio de 2025];19(1):78-91. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/74342>
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro: ABNT; 2010.
- 7 Pierin I. A instabilidade de perfis formados a frio em situação de incêndio [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2011.
- 8 Schafer BW. Constrained and Unconstrained Finite Strip Method (CUFSM). Versão 5.04 [software]. 2020 [acesso em 24 de junho de 2024]. Disponível em: <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>.
- 9 Grigoletti GC. Otimização via algoritmos genéticos de perfis U formados a frio submetidos à compressão utilizando o Método da Resistência Direta [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2008.
- 10 Baságli CD. Sobre o comportamento estrutural de terças de aço considerando a interação com as telhas [dissertação]. São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos; 2004.
- 11 Fakury RH, Silva ALRC, Caldas RB. Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto. 1ª ed. São Paulo: Editora Pearson; 2016.