

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE PERFIS FORMADOS A FRIO

Hugo Vinícius Ferreira Azevedo¹; Matheus Amancio Miranda²;
Luiz Elias da Silva Filho³; Gleide Karolayne Melo Lins⁴; Luciano Barbosa dos Santos⁵

RESUMO

O uso de ferramentas computacionais no ensino favorece a construção de conhecimento, desenvolvem a criatividade e curiosidade no aluno e são um diferencial em tornar o estudo mais dinâmico, fugindo do processo de ensino-aprendizagem padrão em aulas meramente expositivas. Desenvolver a habilidade no aluno de utilizar e desenvolver essas ferramentas é de grande interesse para a melhor maturação dos conceitos estudados. Portanto, esse trabalho tem como foco apresentar a elaboração de uma ferramenta computacional desenvolvida em linguagem de programação *Python*, com o objetivo de servir como objeto de ensino de estruturas metálicas em perfis formados a frio. A ferramenta serve para dimensionar perfis do tipo U simples e U enrijecido submetidas ao esforço de flexão simples no eixo x-x, além de fornecer ao usuário um memorial descritivo de cálculo. Comparando a resposta obtido por meio desta ferramenta com um *software* comercial denominado mCalc_Perfis, observou-se que somente dois perfis do tipo U ultrapassaram 1% e a maioria dos perfis do tipo Ue apresentaram erros próximo a 1%, com apenas dois perfis ultrapassando 2%, dentro de um espaço de oito perfis de cada tipo. Portanto, conclui-se que a ferramenta computacional proposta consegue cumprir seu objetivo de ser utilizada como objeto de ensino pedagógico no ensino dos perfis formados a frio, além de garantir bons resultados na resposta gerada nas análises e fornecer ao usuário um relatório descritivo do memorial de cálculo feito pela ferramenta.

Palavras-Chave: Estruturas de Aço; Método da Largura Efetiva; Flexão Simples; Python.

¹ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões
Email: hugo.azevedo@lccv.ufal.br

² Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões
Email: matheus.miranda@ctec.ufal.br

³ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões
Email: luiz.elias@lccv.ufal.br

⁴ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões
Email: gleidekarolayne@lccv.ufal.br

⁵ Afiliação: Universidade Federal de Alagoas – Campus A.C. Simões
Email: lbsantos@ctec.ufal.br

1 INTRODUÇÃO

O uso das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) está sendo fortemente influenciado na forma de ensinar e aprender Engenharia (COSTA, 2004). O uso das TICs pode mudar a forma como os alunos estudam e aprendem, o uso da tecnologia no ensino rompe com as práticas padrões da educação tradicional, favorecendo a construção do conhecimento (MATOSO, 2014).

As ferramentas computacionais utilizadas no ensino de Engenharia auxiliam o aluno em cálculos e modelagens de problemas, auxiliando a criatividade do aluno em testar um ensino mais dinâmico, sendo um diferencial no entendimento e na fixação do conteúdo. É de grande interesse, nesse contexto, estimular o uso dessas ferramentas e desenvolver no aluno a capacidade de implementar seu aprendizado numa ferramenta própria de utilização.

Nesse contexto, desenvolver uma ferramenta computacional que possa ser utilizada para fins de ensino na sala de aula pode despertar a curiosidade e percepção de outros alunos, diminuindo o tempo de maturação de conceitos. Escolheu-se, então, elaborar um *software* computacional que sirva como objeto de ensino de estruturas metálicas em perfis formados a frio (PFFs).

Os PFFs são obtidos através do dobramento mecânico de chapas finas à temperatura ambiente, em processos de conformação a frio que utilizam matrizes rotativas ou prensas dobradeiras. Sua utilização iniciou-se nos Estados Unidos e Grã-Bretanha em meados do século 19. Desde então, a partir de pesquisas na área, o emprego de PFF tem se tornado cada vez mais viável, tendo grande aplicação na construção de galpões industriais e estruturas treliçadas (MENDES, 2004).

Estes perfis apresentam diversas vantagens frente a outros sistemas construtivos, leveza, versatilidade, alta relação inércia/peso, grandes possibilidades de seções transversais e alta produtividade na construção são apenas alguns dos pontos positivos propiciadas pela adoção de estruturas em PFF (SILVA, 2018). Contudo, os PFFs também apresentam desvantagens, onde pode-se destacar a alta esbelteza dos elementos que formam a seção deixando o perfil bastante susceptível a sofrer o colapso pela flambagem. Devido a esse problema, métodos diferenciados dos métodos utilizados no dimensionamento de perfis soldados ou laminados foram desenvolvidos, a exemplo do Método da Largura Efetiva (MLE) (HILLER, 2009).

Neste contexto, tendo em vista a aplicabilidade do PFF, fica evidente a relevância do conhecimento do engenheiro sobre a utilização e dimensionamento desses perfis, favorecendo a escolha de soluções estruturais mais eficientes por possibilitar mais uma forma de solução estrutural. Dessa forma, esse trabalho apresenta um software para o dimensionamento de perfis U e Ue a flexão simples para fins educacionais. A escolha por começar a implementação com a flexão simples em relação ao eixo de maior inércia dos perfis U e Ue é baseada na grande quantidade de peças (sobretudo vigas e terças de telhados) que enfrentam esse tipo de carregamento. Destaca-se que o programa continua em desenvolvimento e mais funcionalidades serão implementadas no futuro deixando o código ainda mais robusto e suportando mais cenários de carregamento.

2 METODOLOGIA

Conforme a ABNT NBR 14762:2010, o momento fletor resistente de cálculo é determinado tomando-se o menor valor entre o momento de cálculo que causa escoamento

na seção na fibra mais solicitada, o momento de cálculo relacionado à instabilidade lateral com torção e o momento de cálculo referente à instabilidade distorcional da seção transversal.

A Equação 01 fornece o momento fletor resistente de cálculo que causa o escoamento na seção efetiva na fibra mais solicitada:

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad (\text{Equação 01})$$

Sendo:

M_{Rd} = momento resistente de cálculo;

W_{ef} = módulo de resistência elástico da seção efetiva;

f_y = tensão de escoamento do aço.

Segundo Silva et al. (2014), nota-se que, por meio dessa verificação, o centro geométrico da seção efetiva não coincide com o da seção bruta, o que altera a coordenada da fibra mais solicitada para o cálculo do módulo de resistência elástico.

Em vigas fletidas, não contidas lateralmente e que sofrem instabilidade global, ocorre o fenômeno de instabilidade lateral com torção. O momento fletor resistente de cálculo referente à instabilidade lateral com torção é calculado por meio da Equação 02, sobre um trecho compreendido entre seções contidas lateralmente.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad (\text{Equação 02})$$

Sendo:

$W_{c,ef}$ = módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida;

χ_{FLT} = fator de redução associado à instabilidade lateral com torção.

O cálculo do fator de redução associado à instabilidade lateral com torção está associado ao momento fletor crítico de flambagem lateral com torção, cuja formulação envolve um fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes (C_b), obtido pela Equação 03, podendo ser adotado igual a 1,0.

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{max}}{2,5 \cdot M_{max} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C} \quad (\text{Equação 03})$$

Sendo:

M_{max} = máximo valor do momento fletor, em módulo, no trecho analisado;

M_A = valor do momento fletor a $\frac{1}{4}$ do vão destravado;

M_B = valor do momento fletor a $\frac{1}{2}$ do vão destravado;

M_C = valor do momento fletor a $\frac{3}{4}$ do vão destravado.

O momento fletor resistente de cálculo associado à instabilidade por distorção é dado pela Equação 04, para as barras sujeitas a esse fenômeno.

$$M_{Rd} = \frac{\chi_{dist} \cdot W \cdot f_y}{\gamma} \quad (\text{Equação 04})$$

Sendo:

W = módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento;

χ_{dist} = fator de redução associado à instabilidade distorcional.

O cálculo do fator de redução associado à instabilidade distorcional requer a determinação do momento fletor crítico de flambagem distorcional elástica, normalmente obtido por meio da análise de estabilidade elástica. Neste trabalho, utilizou-se a formulação simplificada obtida por Grossi e Malite (2013) apresentada na Equação 05 e na Equação 06.

$$\alpha = 0,001 \cdot \left(\frac{b_f}{t}\right)^{1,1} \cdot \left(\frac{b_w}{D}\right)^{0,8} \cdot \frac{f_y}{300} \quad (\text{Equação 05})$$

$$\chi_{dist} = -0,098 \cdot \alpha^3 + 0,536 \cdot \alpha^2 - 1,056 \cdot \alpha + 1,1 \leq 1,0 \quad (\text{Equação 06})$$

O esforço cortante resistente é calculado por meio da Equação 07, em função da esbeltez da alma do perfil.

$$V_{Rd} = \begin{cases} \frac{0,6 \cdot f_y \cdot h \cdot t}{\gamma}, \text{ se } \frac{h}{t} \leq 1,08 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y}\right)^{0,5} \\ \frac{0,65 \cdot t^2 \cdot (E \cdot k_v \cdot f_y)^{0,5}}{\gamma}, \text{ se } 1,08 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y}\right)^{0,5} < \frac{h}{t} \leq 1,4 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y}\right)^{0,5} \\ \frac{0,905 \cdot E \cdot k_v \cdot t^3}{h \cdot \gamma}, \text{ se } \frac{h}{t} \geq 1,4 \cdot \left(\frac{E \cdot k_v}{f_y}\right)^{0,5} \end{cases} \quad (\text{Equação 07})$$

Sendo:

E = módulo de elasticidade longitudinal do aço;

t = espessura da alma;

h = largura da alma;

$\gamma = 1,1$;

k_v = coeficiente de flambagem local por cisalhamento, que varia com a existência de enrijecedores transversais de alma e da distância entre eles.

Barras que possuem carregamentos transversais aplicados estão sujeitas a momento fletor e esforço cortante e o efeito combinado entre esses esforços deve ser verificado. A Equação 08 deve ser satisfeita no caso de barras sem enrijecedores transversais.

$$\left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}}{V_{Rd}}\right)^2 \leq 1,0 \quad (\text{Equação 08})$$

Sendo:

M_{Sd} = momento fletor solicitante de cálculo;

M_{Rd} = momento fletor resistente de cálculo;

V_{Sd} = esforço cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd} = esforço cortante resistente de cálculo.

No caso de barras sem enrijecedores transversais de alma, a Equação 09 deve ser satisfeita.

$$0,6 \cdot \left(\frac{M_{Sd}}{M_{Rd}}\right) + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd}} \leq 1,3 \quad (\text{Equação 09})$$

Utilizou-se implementações na linguagem de programação Python, criada por Rossum (1995), no desenvolvimento da interface gráfica, cálculos e geração do memorial de cálculo. O pacote PyQT5 (STEELE, 2016) foi usado para a construção da interface gráfica do software e a aba de entrada de dados do software pode ser vista na Figura 1.

Figura 1: Aba de entrada de dados.

The screenshot shows the 'PFF - Flexão Simples' software interface. The 'Entrada de dados' tab is active. It features a dropdown menu for 'Selecione um perfil' and a 'Selecionar' button. Below are input fields for dimensions: b_w (mm), b_f (mm), D (mm), and t_n (mm). The 'Propriedades do material' section includes E (20000 kN/cm²), G (7700 kN/cm²), ν (0,3), and f_y (24 kN/cm²). The 'Comprimentos de flambagem' section has $k_x L_x$ (cm), $k_y L_y$ (cm), and $k_z L_z$ (cm). The 'Enrijecedor' section has a radio button and a field for 'Distância entre enrijecedores de borda' (cm). The 'Esforços de projeto' section has V_{sd} (kN) and M_{sd} (kNcm). At the bottom, there are 'Limpar' and 'Calcular e Verificar' buttons.

Fonte: Autores, 2020.

Pode ser vista na Figura 2 o processo de seleção do perfil a ser verificado, cujas opções são os perfis dispostos nas tabelas do Anexo A da ABNT NBR 6355:2012.

Figura 2: Processo de seleção do perfil.



Fonte: Autores, 2020.

Após a seleção do tipo e dimensões do perfil, o usuário é capaz de informar as propriedades do material e informações relevantes para a verificação, incluindo a presença de enrijecedores transversais de alma. Além disso, adotou-se valores convencionais para alguns parâmetros, que podem ser alterados de acordo com a preferência do usuário.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para apresentar o funcionamento da ferramenta, comparou-se os valores obtidos nela com resultados obtidos pelo módulo mCalc_Perfis do *software* comercial mCalc3D (STABILE, 2019). Os perfis analisados foram escolhidos dentre os presentes nas tabelas do Anexo A da norma ANBT NBR 6355:2012 assim como no catálogo do mCalc_Perfis. As propriedades do material para todas as análises feitas foram:

- 1) Tensão do escoamento do aço $f_y = 24 \text{ kNcm}^{-2}$
- 2) Módulo de elasticidade $E = 200 \text{ GPa}$
- 3) Coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$
- 4) Fator de modificação $C_b = 1$

As dimensões dos perfis, os comprimentos de flambagem e os resultados da resistência à flexão dos perfis U e Ue podem ser vistos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Resultados de resistência à flexão dos perfis U.

Dimensões do perfil (mm)	$k_x L_x$ $= k_y L_y$ $= k_z L_z$	PFF-Flexão Simples (kNcm)	mCalc_Perfis (kNcm)	Erro Relativo	Erro Absoluto
50x25x1,50	200	18,96	18,95	0.05%	0.01
75x40x2,00	200	93,35	92,69	0.71%	0.66
100x40x2,25	200	151,69	151,01	0.44%	0.68
100x50x1,20	300	45,47	45,31	0.35%	0.16
125x75x3,75	300	623,63	616,5	1.14%	7.13
150x50x4,75	300	597,52	596,49	0.17%	1.03
200x75x3,00	200	1005,10	993,15	1.19%	11.95
300x100x4,75	400	2834,53	2812,25	0.78%	22.28

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 2: Resultados de resistência à flexão dos perfis Ue.

Dimensões do perfil (mm)	$k_x L_x$ $= k_y L_y$ $= k_z L_z$	PFF-Flexão Simples (kNcm)	mCalc_Perfis (kNcm)	Erro Relativo	Erro Absoluto
50x25x10x2,00	200	43,83	42,92	2.07%	0.91
75x40x15x2,25	200	157,33	153,99	2.12%	3.34
100x40x17x2,00	200	203,91	200,5	1.67%	3.41
150x60x20x3,00	400	442,64	437,98	1.05%	4.66
200x75x20x3,00	400	913,99	903,4	1.16%	10.59
250x85x25x2,00	400	1077,78	1069,27	0.78%	8.41
300x85x25x3,00	400	1991,33	1968,83	1.12%	22.47
300x100x25x3,75	400	3086,78	3041,45	1.46%	45.33

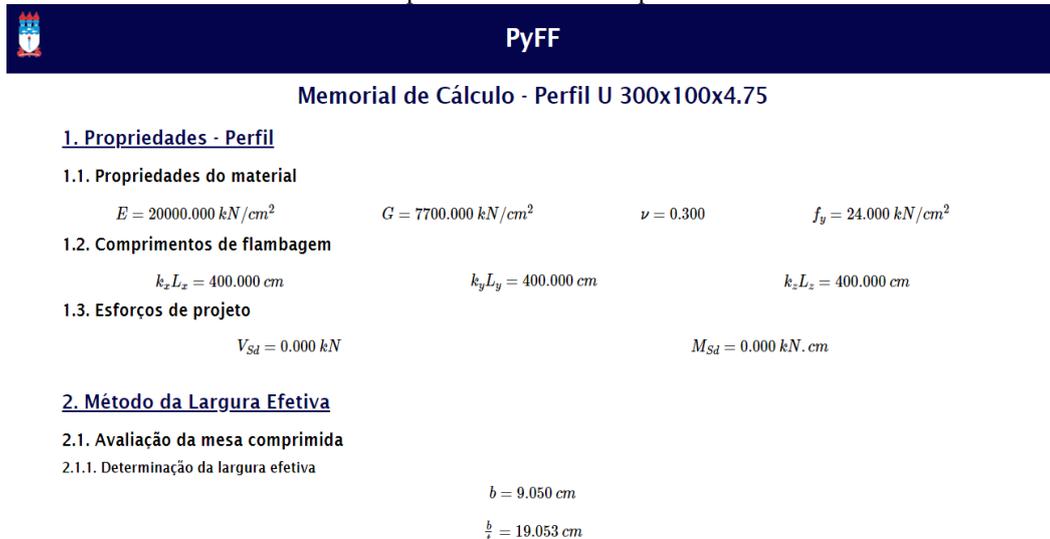
Fonte: Autores, 2020.

Como o *software* comercial mCalc3D calcula as propriedades geométricas dos perfis pelo Método Linear e a ferramenta computacional sendo apresentada neste trabalho utiliza as equações fornecidas na norma ABNT NBR 6355:2012, há diferenças entre os valores dessas propriedades e, conseqüentemente, na resposta fornecida da resistência de cada perfil.

Contudo, observa-se pelas Tabelas 1 e 2 que essas diferenças são pequenas. Somente dois perfis do tipo U ultrapassaram 1% e a maioria dos perfis do tipo Ue apresentaram erros próximo a 1%, com apenas dois perfis ultrapassando 2%. Isso demonstra o quanto a ferramenta computacional é confiável e garante bons resultados, visto que apresenta grande semelhança com um importante *software* comercial.

Além disso, a ferramenta computacional também fornece ao usuário um memorial de cálculo produzido em HTML, feito de forma que a impressão da página em formato PDF possa ser feita sem perda de estética e funcionalidade. Exemplos de partes desse memorial de cálculo podem ser vistas nas Figuras 3 e 4.

Figura 3: Memorial de cálculo fornecido pela ferramenta – Propriedades do Perfil.



PyFF

Memorial de Cálculo - Perfil U 300x100x4.75

1. Propriedades - Perfil

1.1. Propriedades do material

$E = 20000.000 \text{ kN/cm}^2$ $G = 7700.000 \text{ kN/cm}^2$ $\nu = 0.300$ $f_y = 24.000 \text{ kN/cm}^2$

1.2. Comprimentos de flambagem

$k_z L_z = 400.000 \text{ cm}$ $k_y L_y = 400.000 \text{ cm}$ $k_z L_z = 400.000 \text{ cm}$

1.3. Esforços de projeto

$V_{Sd} = 0.000 \text{ kN}$ $M_{Sd} = 0.000 \text{ kN.cm}$

2. Método da Largura Efetiva

2.1. Avaliação da mesa comprimida

2.1.1. Determinação da largura efetiva

$b = 9.050 \text{ cm}$

$\frac{b}{t} = 19.053 \text{ cm}$

Fonte: Autores, 2020.

Figura 4: P Memorial de cálculo fornecido pela ferramenta – Processo Iterativo do MLE.

2. Método da Largura Efetiva

2.1. Avaliação da mesa comprimida

2.1.1. Determinação da largura efetiva

$b = 9.050 \text{ cm}$

$\frac{b}{t} = 19.053 \text{ cm}$

$k = 0.430$

$\lambda_p = 1.059$

$b_{ef} = 6.768 \text{ cm}$

2.1.2. Determinação da área a "retirar" da mesa comprimida

$L_{ret;1} = 2.282 \text{ cm}$

$A_{ret;1} = 1.084 \text{ cm}^2$

$A_{ef;1} = 21.925 \text{ cm}^2$

2.1.3. Parcela de I_x a "retirar" da seção transversal

$I_{xret;1} = 236.220 \text{ cm}^4$

2.1.4. Rebaixamento do C.G. devido a $A_{ret;1}$

$y_1 = 0.730 \text{ cm}$

$Y_{G1} = 15.730 \text{ cm}$

Fonte: Autores, 2020.

4 CONCLUSÕES

Portanto, conclui-se que a ferramenta computacional proposta consegue cumprir seu objetivo de ser utilizada como objeto de ensino pedagógico no ensino dos PFFs, além de garantir bons resultados na resposta gerada nas análises e fornecer ao usuário um relatório descritivo do memorial de cálculo feito pela ferramenta.

O *software* proposto além de possuir uma interface gráfica intuitiva e amigável – que facilita o processo de aprendizado – se diferencia dos seus pares por fornecer o memorial de cálculo de forma completa e organizada. O aluno pode gerar os relatórios para comparar com as respostas obtidas manualmente e essa função também é útil para desenvolver a curiosidade no aluno, ele pode propor mudança nos exercícios, alterando alguma configuração do perfil, do material ou do esforço que está sendo imposto, fazendo o estudo ser mais dinâmico.

Destaca-se, por fim, que melhorias estão sendo pensadas pela equipe de desenvolvimento da ferramenta, como 1) aumentar a quantidade de perfis disponíveis para análise; 2) implementar o estudo de flexão no eixo y-y e 3) implementar flexão oblíqua para os perfis existentes na ferramenta. Espera-se que o *software* seja gratuito e disponibilizado por algum meio digital ligado à Universidade Federal de Alagoas assim que estiver licenciado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 6355**: Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização. Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, L. A. C. **Avaliação da aprendizagem no ensino de estruturas: epistemologia, tecnologia e educação a distância**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004. 213p. Tese de Doutorado.

HILLER, Guilherme Rieger. **Estudo Comparativo de Diferentes Modalidades do Método da Resistência Direta no Estudo de Perfis Formados a Frio**. Porto Alegre: Dissertação de Conclusão de Curso. UFRGS, 2009.

MATOSO, L. M. L. **A importância da monitoria na Formação acadêmica do monitor: Um relato de experiência**. CATUSSABA-ISSN 2237-3608, v. 3, n. 2, p. 77-83, 2014.

MENDES, C. L. (2004). **Estudo sobre perfis formados a frio em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ROSSUM, Guido. Python reference manual. 1995.

SILVA, Edson Lubas; PIERIN, Igor; SILVA, V. P. S. 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**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 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.** 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil (Estruturas)) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2018.

STABILE ENGENHARIA. mCalc3D. 2019. Disponível em: <<http://www.stabile.com.br/mcalc3d.php>>. Acesso em: 30 out. 2020.

STEELE, Andrew. **PyQt5 Tutorial Documentation Release 1.0.** 2016.

Promoção e realização:



ANAIS DA VII SEMANA DE ENGENHARIA - SEMENGE