



COBENGE
2021

XLIX Congresso Brasileiro
de Educação em Engenharia
e IV Simpósio Internacional
de Educação em Engenharia
da ABENGE

28 a 30 de SETEMBRO

Evento Online

"Formação em Engenharia:
Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade"

UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DA SEÇÃO DE PERFIS DE AÇO DE PAREDES FINAS: IMPACTOS NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZADO

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2021.3554

Natan Sian das Neves - natan.sian@gmail.com
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rua Santa Rosa 136
29164-302 - serra - ES

Resumo: Este artigo concentra-se na apresentação de um código numérico para cálculo das propriedades da seção transversal de perfis de aço de paredes finas de seção aberta. Em paralelo, busca-se realizar uma reflexão acerca dos impactos da utilização de recursos computacional no processo de ensino-aprendizado na engenharia. A implementação computacional do programa é desenvolvida em ambiente Matlab por meio de uma programação estruturada. O programa visa calcular as propriedades geométricas básicas e relativas ao comportamento do empenamento da seção. Para validação dos resultados numéricos utiliza-se o programa GBTul. Com base nas respostas obtidos com o programa, pode-se concluir que o código desenvolvido apresenta resultados satisfatórios diante os comportamentos previstos na literatura. O programa torna-se uma ferramenta simples e versátil para os discentes nos estudos em disciplinas da área estrutural na engenharia civil.

Palavras-chave: ensino, aço formado a frio, código, propriedades da seção

Promoção:



Realização:



UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DAS PROPRIEDADES DA SEÇÃO DE PERFIS DE AÇO DE PAREDES FINAS: IMPACTOS NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZADO

1 INTRODUÇÃO

As estruturas formadas por perfis formados a frio ganharam intensivo espaço na construção civil devido ao fácil processo de fabricação, resultando em elementos estruturais esbeltos, leves e com baixo custo. Contudo, essas características dos perfis formados a frio não favorecem no ponto de vista da análise e dimensionamento estrutural, uma vez que esses elementos são sujeitos à ocorrência de fenômenos de instabilidades, que devem ser verificadas durante a elaboração dos projetos dessas estruturas. Para cada tipo de fenômeno de instabilidade tem-se um comportamento físico e um tratamento matemático específico.

Neste contexto, para dimensionar os perfis de aço de paredes finas deve-se, previamente, conhecer as propriedades geométricas da seção transversal do elemento de aço. Esses tipos de perfis de aço são suscetíveis à ocorrência do fenômeno de empenamento da seção (em inglês, *warping*). Desta maneira, o cálculo das propriedades geométricas por meio de técnicas analíticas torna-se uma tarefa exaustiva e passível de erro. Nesta linha, o presente trabalho busca apresentar um código computacional desenvolvido em ambiente Matlab destinado ao cálculo das propriedades geométricas da seção transversal de perfis de aço formados a frio. O Matlab foi escolhido com recurso computacional primal por conta da simplicidade e versatilidade ao longo da implementação, que por sua vez, facilita o entendimento e aplicação dos discentes (NEVES *et al.*, 2018).

O código desenvolvido é validado com base nos resultados do programa computacional GBTul (BEBIANO *et al.*, 2018). A ferramenta computacional GBTul é um programa *free* que visa realizar análises de flambagem elástica (bifurcação) e vibração de membros prismáticos de paredes finas. A base matemática-numérica do programa é fundamentada no método da teoria de viga generalizada (ou *Generalised Beam Theory* - GBT).

2 TEORIA FÍSICA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

As investigações e os procedimentos de cálculo são realizados com base em um código computacional desenvolvido, em ambiente Matlab R2019a, para o cálculo das propriedades da seção transversal de perfis de aço formado a frio, conforme mostra o algoritmo na Figura 1. Observa-se que o código possibilita calcular: área, momento estático, momento de inércia no sistema cartesiano e no principal, produto de inércia, coordenadas do centroide e do centro de cisalhamento, constante de torção, constante de empenamento, raio de giração e de giração polar. A base teórica utilizada para o desenvolvimento do código computacional tem como base os fundamentos da estabilidade de estruturas (TIMOSHENKO, 2009) e dos procedimentos normativos para perfis formados a frio (ABNT NBR 14762, 2010). Deve-se salientar que a malha numérica de entrada do programa (*input file*) é gerada com auxílio do programa GMSH (GEUZAIN; REMACLE, 2009).



Figura 1 – Estrutural geral do código computacional desenvolvido em Matlab.

```

1 [file1,file2, text] = Input_Secao(TIPO.SECAO);
2 [N_nox,N_ele,elements,Ncoor,Nce] = Input_Mesh_GMSH(file1,file2);
3
4 %%% PROCEDIMENTO - CALCULOS DAS PROPRIEDADES DA SEÇÃO =====
5
6 %%% PROPRIEDADES DA SEÇÃO - EIXOS CARTESIANOS XY
7 [Ix,Iy,Ixy,xc,yc,A,Qx,Qy,L,t,Xd,Yd,Xm,Ym] = PROP_CARTES(N_ele,Ncoor,Nce);
8
9 %%% PROPRIEDADES DA SEÇÃO - EIXOS PRINCIPAIS 12
10 [I1,I2,theta,Ncoor12] = PROP_PRINCIPAL(Ix,Iy,Ixy,N_nox,N_ele,Ncoor,Nce,L,t,xc,yc);
11
12 %%% PROPRIEDADES ASSOCIADO AO COMPORTAMENTO DE TORÇÃO E CISALHAMENTO
13 [J, xs, ys,Cw, B1,B2,wn,ro] = PROP_SHEAR_TORC(nts,...
14 Ix,Iy,Ixy,I1,I2,N_ele,N_nox,Ncoor,Ncoor12,Nce,L,t,xc,yc,A,theta,text);
15
16 %%% POS-PROCESSAMENTO =====
17
18 %%% OUTPUT - RESULTADOS
19 fprintf('\n ===== \n')
20 fprintf('Propriedades da Seção: \n\n')
21 fprintf('Área: %f \n', A)
22 fprintf('Momento Estático X: %f \n', Qx)
23 fprintf('Momento Estático Y: %f \n', Qy)
24 fprintf('Momento de Inércia X: %f \n', Ix)
25 fprintf('Momento de Inércia Y: %f \n', Iy)
26 fprintf('Produto de Inércia XY: %f \n', Ixy)
27 fprintf('Momento de Inércia Principal 1: %f \n', I1)
28 fprintf('Momento de Inércia Principal 2: %f \n', I2)
29 fprintf('Coord Centróide Xc: %f \n', xc)
30 fprintf('Coord Centróide Yc: %f \n', yc)
31 fprintf('Coord Cisalhamento Xs: %f \n', xs)
32 fprintf('Coord Cisalhamento Ys: %f \n', ys)
33 fprintf('Constante Torsional J: %f \n', J)
34 fprintf('Constante Cw: %f \n', Cw)
35 fprintf('Raio de Giração rx: %f \n', rx);
36 fprintf('Raio de Giração ry: : %f \n', ry);
37 fprintf('Distância x0: %f \n', x0);
38 fprintf('Distância y0: %f \n', y0);
39 fprintf('Raio de Giração Polar ao SC: %f \n', r0);

```

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

As funções computacionais contidas internamente no código (ver Figura 1) são responsáveis por computar as propriedades da seção: (i) PROP_CARTES – cálculo das propriedades da seção em relação ao sistema cartesiano (x e y); (ii) PROP_PRINCIPAL – cálculo das propriedades da seção em relação ao sistema principal (1 e 2) e (iii) PROP_SHEAR_TORC – cálculo das propriedades da seção associadas aos parâmetros de torção e cisalhamento. As principais formulações numéricas utilizadas na implementação dessas rotinas são apresentadas a seguir.

As coordenadas do centroide de uma seção (x_c , y_c) podem ser obtidas a partir das seguintes expressões:

$$x_c = \frac{Q_x}{A} \quad y_c = \frac{Q_y}{A} \quad (1)$$

onde A representa a área da seção e $Q_x = \int_A x dA$ e $Q_y = \int_A y dA$ são os momentos estáticos – calculados por meio de uma integral de área. O comprimento de cada segmento reto é computado com base nas coordenadas cartesianas, conforme posto na Equação (2).



$$L_e = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + \Delta(y_f - y_i)^2} \quad (2)$$

A partir do comprimento de cada segmento reto, pode-se determinar a área de cada segmento, fazendo $A_e = L_e t$. A área e o comprimento total da seção são calculados por meio da somatória de todas as propriedades de cada segmento de barra que compõem a seção do perfil formado a frio.

Os momentos de inércia da seção, nas direções x e y , podem ser determinados pela Equação (3). Deve-se aplicar o teorema dos eixos paralelos ao longo da programação do código computacional.

$$I_x = \int_A x^2 dA \quad I_y = \int_A y^2 dA \quad I_{xy} = \int_A xy dA \quad (3)$$

Para determinar os momentos de inércia em relação ao sistema principal, utiliza-se uma transformação de coordenada. O ângulo de transformação é determinado em função dos momentos de inércia nos eixos cartesianos, conforme posto na Equação (4).

$$\operatorname{tg} 2\theta_p = \frac{-I_{xy}}{(I_x - I_y)/2} \quad (4)$$

As coordenadas principais u e v são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned} u &= \bar{X} \cos \theta_p + \bar{Y} \sin \theta_p \\ v &= \bar{Y} \cos \theta_p - \bar{X} \sin \theta_p \end{aligned} \quad (5)$$

onde \bar{X} e \bar{Y} são as coordenadas após a translação para coincidir com o centroide da seção transversal (uma transformação de coordenadas). A partir do conhecimento das coordenadas principais, basta aplicar o teorema dos eixos paralelos para computar os momentos de inércia principais (I_1 e I_2).

Em um segundo momento, apresenta-se as formulações gerais utilizadas na implementação para o cálculo das propriedades da seção associadas ao comportamento de torção, empenamento e cisalhamento. Primeiramente, a constante de torção de Saint Venant (J) é determinada pela Equação (6). Como pode ser visto, essa constante depende do tipo de seção analisada - aberta ou fechada.

$$J = \frac{4A_t^2}{\oint ds/t} \quad (\text{Seção-Fechada}) \quad \text{e} \quad = \frac{1}{3} \sum s t^3 \quad (\text{Seção-Aberta}) \quad (6)$$

Para o cálculo das propriedades geométricas setoriais foi necessário obter funções genéricas para x e y ao longo do segmento considerado, conforme expresso a seguir:

$$x_{(s)} = s \cos \theta + x_i \quad y_{(s)} = s \sin \theta + y_i \quad (7)$$

A área setorial (ω) ou usualmente conhecido na engenharia como função de empenamento, que pode ser calculado conforme dado pela Equação (7).

$$\omega_A(s) = \int_{s_0}^s h_A(s) ds \quad (8)$$

Onde h_A é o produtor interno entre um vetor com origem no ponto A e extremidade final num ponto (x, y) da linha central da seção, e um vetor unitário normal aplicado no ponto (x, y) . A constante de empenamento da seção, na forma generalizada, é computada pela Equação (9).

$$C_w = t \int \omega^2(s) ds \quad (9)$$

Em segmentos retos, a área setorial é descrita por uma variação linear. Assim, calculadas os valores da função empenamento no nó inicial e final de um segmento, pode-se escrever a seguinte expressão:

$$\omega_{(s)} = \omega_i + (\omega_f - \omega_i) / l s \quad (10)$$

em que ω_i e ω_f são, respectivamente, os valores da função empenamento nos nós inicial e final do segmento. A Equação (10) foi aplicada no cálculo das propriedades setoriais no ponto provisório A , por meio da integração da área setorial. Desta forma, com base nas Equações (7), (8) e (10), o momento estático setorial, os momentos de inércia setoriais e a constante de empenamento, são computadas pelas expressões a seguir:

$$\begin{aligned} Q_{\omega_A} &= \int_0^l \left[\omega_i + (\omega_f - \omega_i) / l s \right] ds & I_{x\omega_A} &= t \int_0^l \left[\omega_i + (\omega_f - \omega_i) / l s \right] (\cos \theta \cdot s + x_i) ds \\ I_{y\omega_A} &= t \int_0^l \left[\omega_i + (\omega_f - \omega_i) / l s \right] (\sin \theta \cdot s + y_i) ds & C_w &= t \int_0^l \left[\omega_i + (\omega_f - \omega_i) / l s \right]^2 ds \end{aligned} \quad (11)$$

Computadas as propriedades geométricas e setoriais da seção no ponto provisório, as coordenadas do centro de cisalhamento foram calculadas por meio da expressão a seguir:

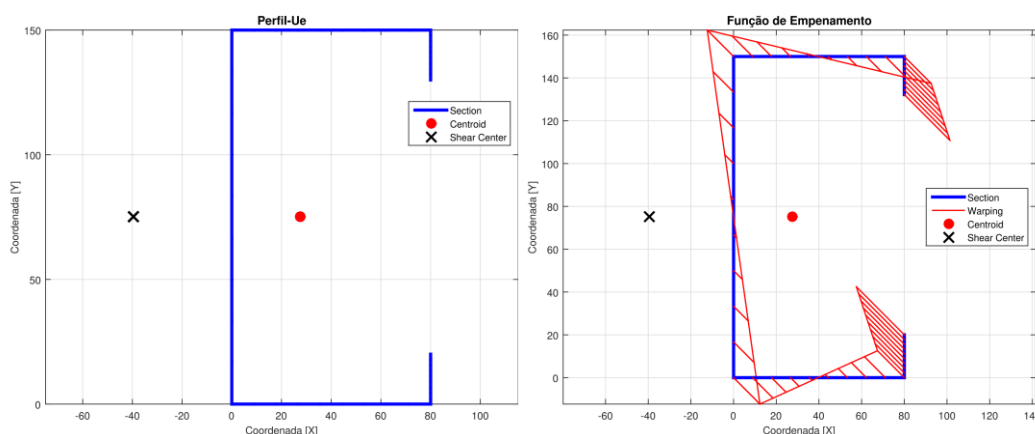
$$\begin{bmatrix} I_{xy} - y_c Q_x & x_c Q_x - I_x \\ I_y - y_c Q_y & x_c Q_y - I_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I_{x\omega_A} + x_A (I_{xy} - y_c Q_x) - y_A (I_x - x_c Q_x) - Q_{\omega_A} x_c \\ I_{y\omega_A} + x_A (I_y - y_c Q_y) - y_A (I_{xy} - x_c Q_y) - Q_{\omega_A} y_c \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Com base nas equações e formulações matemáticas apresentadas anteriormente, pode-se calcular as propriedades geométricas gerais de uma seção transversal de um perfil de aço formado a frio. Esses valores são importantes para procedimentos simplificados de cálculo, conforme descrito ABNT NBR 14762 (2010).

3 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

O primeiro caso-teste estudado consiste em um perfil Ue de dimensões 150x80x20x2 (mm) com raio interno de dobramento igual a espessura do perfil. A Figura 2 apresenta a localização geométrica do centroide e do centro de cisalhamento, bem como a função de empenamento na seção. Observa-se que o centro de cisalhamento representa o ponto da seção transversal que impede a torção da peça, uma vez que a carga externa seja aplicada fora desse ponto, o elemento estrutural pode estar suscetível aos efeitos torcionais.

Figura 2 – Perfil Ue: centro de cisalhamento, centroide e função empenamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

É possível notar que em cada elemento do perfil Ue, a função empenamento varia linearmente (ver Figura 2). Além disso, para computar as forças resistentes dos elementos estruturais é necessário o cálculo das propriedades geométricas da seção. Para avaliar os resultados obtidos do programa desenvolvido para cálculo das propriedades geométricas da seção Ue, compara-se com os dados numéricos obtidos com programa GBTul (BEBIANO *et al.*, 2018), conforme mostra a Tabela 1(a). Observa-se que os resultados apresentam boa semelhança com a solução de referência.

Tabela 1 - Valores das propriedades geométricas da seção transversal do (a) perfil Ue e (b) assimétrico.

Propriedade	Presente Trabalho	GBTul	Erro (%)	Presente Trabalho	GBTul	Erro (%)
A	700,0000	700	0,00E+00	860,0000	860,0000	0,00E+00
I_1	2703166,6667	2703273	3,93E-03	4627342,3669	4627465,7469	2,67E-03
I_2	668038,0952	668164,8	1,90E-02	1056382,4393	1056545,7260	1,55E-02
C_w	3309244712,9909	3,31E+09	2,28E-02	3176574591,73	3179436202,29	9,00E-02
J	933,3333	933,3333	0,00E+00	1146,6667	1146,6667	0,00E+00
x_c	27,4286	27,42857	1,09E-04	31,8605	31,8605	0,00E+00
y_c	75,0000	75	0,00E+00	121,5116	121,5116	0,00E+00
x_s	-39,6375	-39,6375	0,00E+00	-15,5867	-15,5867	0,00E+00
y_s	75,0000	75	0,00E+00	210,2937	210,2937	0,00E+00

(a)

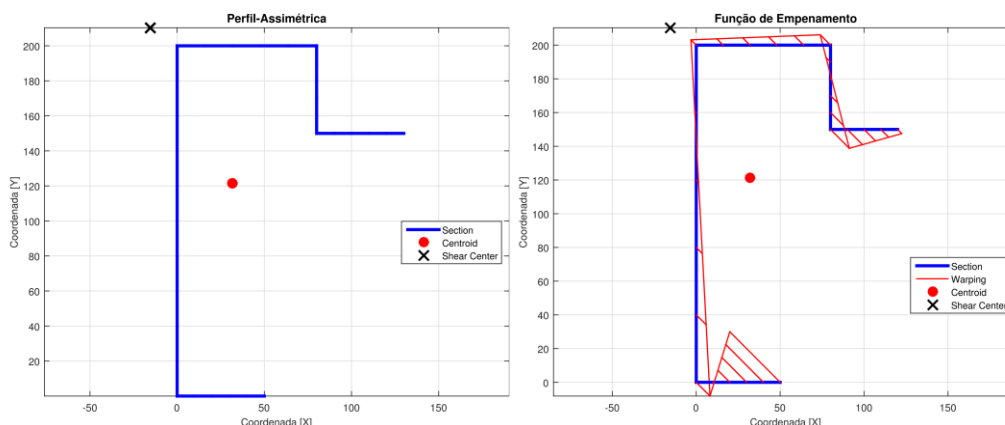
(b)

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

Em um segundo momento, analisa-se um perfil assimétrico de paredes finas. A Figura 3 apresenta a representação geométrica da seção transversal estudada, bem como

as localizações do centroide, do centro de cisalhamento e a distribuição do empenamento ao longo de cada elemento da seção de aço (mesa, alma e enrijecedor).

Figura 3 – Perfil assimétrico - centro de cisalhamento, centroide e função empenamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

A Tabela 2(b) mostra a validação dos resultados obtidos do presente trabalho e os valores do programa GBTul. Conforme pode-se observar, os valores encontrados mostram coerentes com os dados de referência, atingindo valores diminutos de erro percentual médio.

4 ASPECTOS EDUCACIONAIS NO PROCESSO DE ENSINO

Nos cursos de engenharia, não é novidade a existência de disciplinas que exigem dos discentes uma base sólida dos conceitos físicos-matemáticos adquiridos ao longo do ciclo básico de formação de engenharia (e.g.: derivadas, integrais, programação, estática e análise gráfica). Todavia, as formulações e conceitos abstratos que são exigidos e apresentados nas disciplinas técnicas aos discentes torna, em muitas circunstâncias, de difícil compreensão. Sendo assim, o desenvolvimento de ferramentas computacionais proporciona uma dinamização e melhoria do processo de ensino-aprendizado em disciplinas em cursos de engenharia. Existem inúmeras vantagens, tanto para os discentes como para os docentes, na aplicação e desenvolvido dessas ferramentas em disciplinas complexas de cálculo da engenharia, como análise estrutural, resistência dos materiais, dimensionamento de estruturas (aço, concreto, mistas, madeira), mecânica geral e dentre outras (NEVES, 2020).

Neste trabalho, nas seções anteriores, foi apresentado um código desenvolvido para cálculo das propriedades geométricas de perfis de aço de paredes finas. Essa ferramenta tem um papel importante no binômio discente-docente, a seguir são apresentados alguns pontos e benefícios da utilização desses recursos. Primeiramente, para os discentes, a utilização dessas ferramentas possibilita inúmeros benefícios: (i) melhoria do processo de aprendizado do conteúdo em disciplinas complexas da engenharia; (ii) permite que o aluno tenha um “gabarito” para conferir os exercícios desenvolvimentos analiticamente; (iii) visualização dos comportamentos físicos; (iv) após fixação e prática do conteúdo, a ferramenta torna-se um recurso prático e ágil para projetos futuros (não existe necessidade do discente realizar os cálculos manualmente toda vez que seja necessário, uma vez que ele já compreendeu os conceitos e existe uma ferramenta computacional para tal

finalidade); (v) oportunidade ao discente de realizar projetos de iniciação científica e possíveis temas de trabalho de conclusão de curso, uma vez que a construção dessas ferramentas podem auxiliar na solução de diversos problemas práticos da engenharia e (vi) introdução ao discente ao contexto de pesquisa científica (e.g.: produção, publicação e participação de eventos/congressos).

Em um segundo momento, para os docentes, essas ferramentas apresentam alguns benéficos, por exemplo: (i) auxiliar na explicação de conceitos e na solução de problemas de engenharia; (ii) elaboração de projetos acadêmicos e produções científicas; (iii) possibilita um maior engajamento e interação na sala de aula dos discentes, uma vez que esses recursos computacionais são dinâmicos e "chamativos"; (iv) permite a criação/verificação rápida de exercícios/trabalhos/avaliações com diferentes parâmetros físicos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou apresentar um código computacional desenvolvido em ambiente Matlab para estimar os valores das propriedades geométricas de seções de aço de paredes finas e realizar uma análise dos impactos que essas ferramentas geram no processo de ensino na formação dos discentes de cursos de engenharia. Primeiramente, a partir dos resultados apresentados dos casos estudados neste trabalho, o programa apresenta um comportamento semelhante com a literatura, exibindo um baixo nível de erro médio. Em relação aos aspectos educacionais, o código computacional desenvolvido torna-se uma ferramenta simples e prática de ser aplicada em ambientes de ensino físicos/remotos, tornando a exposição do conteúdo mais atrativa aos discentes. Sendo assim, possibilitando uma dinamização do processo de aprendizado dos discentes em disciplinas clássicas da área estrutural em cursos de engenharia.

REFERÊNCIAS

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

BEBIANO, R.; CAMOTIM, D.; GONÇALVES, R. GBTul 2.0– A second-generation code for the GBT-based buckling and vibration analysis of thin-walled members. **Thin-Walled Structures**, v. 124, p. 235-257, 2018.

GEUZAIN, Christophe; REMACLE, Jean-François. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. **International journal for numerical methods in engineering**, v. 79, n. 11, p. 1309-1331, 2009.

MATLAB. **Version 9.6.0 (R2019a)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2019.

NEVES, Natan Sian O uso da interface gráfica computacional como ferramenta interdisciplinar na engenharia. In: XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2020. **Anais**.

NEVES, Natan Sian; SOUZA, Rovenia Meirelles; PINHEIRO, Vitor Pancieri. A importância dos modelos teóricos e técnicas numéricas na construção de um elo com a prática da engenharia estrutural. **REVISTA EIXO**, v. 7, n. 1, p. 26-35, 2018.

PIMENTEL, Flaidier Alves. Desenvolvimento de interface gráfica e cálculo de vigas hiperestáticas aplicados ao ensino de Engenharia. **RCT-Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 5, 2017.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. New York: Courier Corporation, 2009.

A COMPUTATIONAL CODE FOR CALCULATING THE PROPERTIES OF THE THIN-WALLED STEEL PROFILES CROSS-SECTION: IMPACTS ON THE TEACHING-LEARNING PROCESS

Abstract: *This article focuses on the presentation of a numerical code for calculating the cross-section properties of thin-walled steel profiles with an open section. In parallel, we seek to reflect on the impacts of the use of computational resources on the teaching-learning process in engineering. The computational implementation of the program is developed in a Matlab environment through structured programming. The program aims to calculate the basic geometric properties and the behavior of the section warping. To validate the numerical results, the GBTul program is used. Based on the responses obtained with the program, it can be concluded that the developed code presents satisfactory results in view of the behaviors provided for in the literature. The program becomes a simple and versatile tool for students studying structural disciplines in civil engineering.*

Keywords: *teaching, cold-formed steel, code, section properties.*