RELATÓRIO FINAL - IFSP

Programa On-line para cálculo e estudo de propriedades geométricas de seções transversais retangulares e circulares

Maria Eduarda dos Santos Aguiar, (17) 98191-5810,
maria.aguiar@aluno.ifsp.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo-IFSP
Av. Jerônimo Figueira da Costa, 3014 – Votuporanga – São Paulo - SP
CEP: 15503-110
Telefone: 17-3426-6990
e-mail: prp@ifsp.edu.br;

Gustavo Cabrelli Nirschl, (17) 99153-2855, nirschl@ifsp.edu.br

RESUMO

O prazo de um projeto na Engenharia Civil é um dos fatores mais importantes quando o cliente está analisando as propostas para a contratação dos serviços de execução de projeto. Para reduzir o prazo sem perder a qualidade, a evolução tecnológica trouxe consigo *softwares*, que cada dia estão mais presentes na vida dos profissionais que realizam a elaboração dos projetos. Pensando nisso, o programa *on-line* IFSEÇÃO foi criado para realizar os cálculos, o desenho em escala e um relatório no formato pdf (*portable document format*) que exibe a rotina de cálculo das propriedades geométricas de seções transversais retangulares e circulares, para então auxiliar estudantes, professores e profissionais.

APRESENTAÇÃO (INTRODUÇÃO, JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS)

Introdução:

O conhecimento das propriedades geométricas de uma seção transversal de um elemento linear é extremamente importante para a engenharia civil. Sem

essas informações, não seria possível dimensionar peças estruturais nem verificar estabilidades individuais e globais perante a estrutura em análise. Beer e Johnston (1995) cita que o dimensionamento e a verificação da capacidade resistente de barras, como de qualquer elemento estrutural, dependem de grandezas chamadas tensões, as quais se distribuem ao longo das seções transversais de um corpo. Daí vem a necessidade de se conhecer claramente as características ou propriedades das figuras geométricas que formam essas seções transversais.

Para o exemplo do projeto de uma viga, Beer e Johnston (1995) expõe que devemos escolher o material (os mais comuns exemplificados pelo autor são: concreto armado, madeira e perfis de aço) e as dimensões da seção transversal de modo que ela não venha a falhar devido a um dado carregamento (dimensionamento). Como análise estrutural, o autor mostra a determinação dos maiores valores dos esforços de momento fletor (M) e força cortante (V). O dimensionamento, neste exemplo, é feito, entre outras considerações, de modo que a tensão normal (σ) e a tensão cisalhante (τ) atuantes sejam menores que tensões admissíveis do material, advindas de ensaios e normas técnicas. No caso de uma viga prismática (viga reta com seção transversal uniforme) submetida a ação de carregamento transversal (flexão simples reta - FSR), as tensões são dadas pelo autor como:

$$\sigma_{FSR} = \frac{M}{I} * y \quad (1)$$

$$\tau_{FSR} = \frac{V*Ms}{I*b} \quad (2)$$

Em que:

- I é o momento de inércia da área da seção transversal com relação à linha neutra;
- y é a distância a partir do eixo neutro, na seção transversal;
- Ms é o momento estático da área localizada acima ou abaixo da linha neutra, na seção transversal
- b é a largura da seção transversal na linha neutra

No exemplo das equações 1 e 2, aparecem algumas propriedades geométricas das seções transversais e muitas outras são necessárias no

dimensionamento dos mais variados sistemas estruturais e possibilidades de material, conforme, por exemplo, exemplos apresentados no livro de Sales (2005). Os autores Beer e Johnston (1995) apresentam com mais detalhes as fórmulas e conceitos para o cálculo de propriedades diversas das seções transversais, variando desde conceitos mais simples como o cálculo de área até os mais complexos como momento de inércia polar.

Sendo assim, criou-se um módulo de programa on-line que mostra os cálculos e desenhos das propriedades geométricas de seções transversais em forma retangular e circular de elementos estruturais, como área, momento de inércia, centro de gravidade, entre outros, bem como gera um relatório no formato *pdf (portable document format)* com todos os procedimentos de cálculos e teoria, para que tanto alunos e profissionais da Engenharia Civil possam utilizá-lo como material de estudo e elemento auxiliador na metodologia de ensino-aprendizagem. As propriedades consideradas neste projeto estão nos itens a seguir.

1. *PROPRIEDADES*

1.1. *ÁREA*

Dependendo da forma da seção transversal, pode-se calcular sua área total subdividindo-a em retângulos ou círculos, cujas áreas são classicamente determinadas.

Como exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), num elemento estrutural linear submetido a ação axial, a área da seção transversal é aplicada no cálculo da tensão normal atuante, dada pela equação 3.

$$\sigma_{Axial} = \frac{F}{S} \tag{3}$$

Em que:

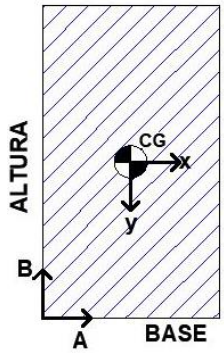
- F é a força axial atuante.

Sendo assim, quanto maior a área da seção transversal (S), menor a tensão atuante no caso de ação axial.

Na Figura 1, a equação para calcular a área de uma seção transversal retangular é dada segundo Melconian (2012) pela equação 4, onde b é a base e h é a altura da seção transversal retangular, como exemplifica a Figura 1:

$$Sret = b \times h \quad (4)$$

Figura 1 – Área da seção transversal retangular.

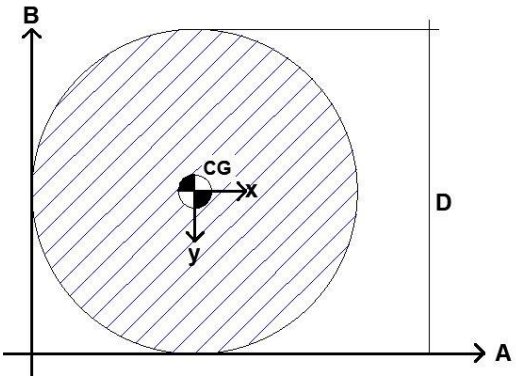


Fonte: O próprio autor (2022)

Segundo Melconian (2012), a área do círculo é dada pela equação 5, onde D é o diâmetro da seção transversal circular, como exemplifica a Figura 2:

$$Scirc = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (5)$$

Figura 2 – Área da seção transversal circular.



Fonte: O próprio autor (2022)

1.2. *CENTRÓIDE*

Segundo CESAD (2021), o centróide é o ponto no interior de uma forma geométrica que define seu centro geométrico. É importante definir ainda outros parâmetros que podem se relacionar com o centróide: o centro de massa é o ponto onde pode ser pensado que toda a massa do corpo está concentrada para o cálculo de vários efeitos. O centróide, o centro de gravidade e o centro de massa coincidem quando a estrutura tem peso específico e espessura constante, ou seja, quando é constituída de um só material homogêneo.

Conforme Beer e Johnston (1995), na flexão simples reta de uma estrutura linear, o eixo neutro passa pelo centróide da seção transversal, estando definido o ponto para a obtenção do valor de “y” que aparece na equação 1.

Segundo Melconian (2012), no caso da seção transversal retangular, o centróide está representado pela equação 6, (considerando a origem no canto inferior esquerdo, conforme a Figura 1):

$$Acg_{ret} = \frac{b}{2} \quad e \quad Bcg_{ret} = \frac{h}{2} \tag{6}$$

Já para seção transversal circular, Melconian (2012) o centróide está representado pela equação 7, (considerando a origem no canto inferior esquerdo, conforme a Figura 2):

$$Acg_{circ} = Bcg_{circ} = \frac{D}{2} \tag{7}$$

1.3. CENTRO DE TORÇÃO

O centro de torção (ou centro de cisalhamento ou centro de cortante) é tal que, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), qualquer esforço cortante que passe por ele não produzirá momento torçor na seção transversal. Para seções transversais simétricas, coincide com o centro de gravidade.

Como as seções transversais retangulares e circulares são simétricas, para seção retangular e circular, valem, respectivamente, para calcular as coordenadas A e B do centro de torção, as equações 6 e 7.

1.4. MOMENTO DE INÉRCIA

O momento de inércia (também chamado de momento de inércia axial) é uma característica geométrica da seção transversal que contribui para se medir a resistência ao tombamento (ou à deformação) em relação a um eixo de uma barra e aparece, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), na equação 1. Portanto, quanto maior o momento de inércia, menor a tensão atuante no caso de flexão simples reta.

Segundo Melconian (2012), no caso de seção transversal retangular usa-se, a equação 8, (em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade):

$$Ix_{ret} = \frac{b \times h^3}{12} \quad e \quad Iy_{ret} = \frac{h \times b^3}{12} \tag{8}$$

Já para seção transversal circular, Melconian (2012) diz que o momento de inércia é dado pela equação 9, (em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade):

$$Ix_{circ} = \frac{\pi \times D^4}{64} = Iy_{circ} \quad (9)$$

1.5. MOMENTO POLAR DE INÉRCIA

Também chamado de momento de inércia à torção, é, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), uma caraterística importante nos problemas relativos à torção. Beer e Johnston (1995) exemplificam, no problema da torção pura numa barra circular, o cálculo da tensão cisalhante atuante como:

$$\tau_{TOR} = \frac{T}{J}\rho \quad (10)$$

Em que:

- T é a o momento torçor atuante na seção transversal;
- ρ é a distância a partir do eixo da barra, na seção transversal;
- J é o momento polar de inércia.

Analisando-se a equação 10, quanto maior o momento polar de inércia, menor a tensão cisalhante atuante no caso de torção pura numa seção circular.

Beer e Johnston (1995) afirmam que o momento polar de inércia de uma seção transversal circular é dado pela equação 11:

$$J_{circ} = \frac{\pi \times R^4}{2} = \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{D}{2}\right)^4 = \frac{\pi \times D^4}{32} \quad (11)$$

No caso de seções não circulares (retangular, por exemplo), a tensão cisalhante devido à torção necessita de coeficientes de torção, que serão apresentados no próximo item. Ainda para seções retangulares, o momento polar de inércia está mostrado no item 1.11.

1.6. COEFICIENTES DE TORÇÃO PARA SEÇÕES NÃO-CIRCULARES

Beer e Johnston (1995) afirmam que os cálculos de tensões cisalhantes de torção em seções transversais não circulares são complexos e dependem da teoria da elasticidade. Os autores apresentam a equação 12 como exemplo do cálculo da tensão de cisalhamento máxima para o caso de uma seção transversal retangular.

$$\tau_{máx,tor,ret} = \frac{T}{c_1 ab^2} \quad (12)$$

Em que:

- c1 é um coeficiente de torção dado pela Tabela 1;
- a: maior dimensão da seção transversal;
- b: menor dimensão da seção transversal.

Tabela 1: Coeficientes de torção para seção retangular

a/b	c_1	c_2
1,0	0,208	0,1406
1,2	0,219	0,1661
1,5	0,231	0,1958
2,0	0,246	0,229
2,5	0,258	0,249
3,0	0,267	0,263
4,0	0,282	0,281
5,0	0,291	0,291
10,0	0,312	0,312
∞	0,333	0,333

Fonte: Adaptado de Beer e Johnston (1995)

c2 são coeficientes usados no cálculo do momento polar de inércia, que está mostrado no item 1.11.

1.7. PRODUTO DE INÉRCIA

Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), o produto de inércia mede a anti-simetria da distribuição de massa de um corpo em relação a um par de eixos com origem em seu baricentro.

Segundo Melconian (2012), para ambas as seções transversais, retangular e circular, o produto de inércia é dado pela equação 13:

$$I_{xy} = 0 \quad (13)$$

1.8. MOMENTO ESTÁTICO

O momento estático (Ms) aparece em exemplos de Beer e Johnston (1995) sobre o cálculo da tensão cisalhante atuante no caso da flexão simples reta, dado pela equação 2. Assim, fisicamente, quanto maior a simetria de uma

seção, menor o momento estático e, por consequência, menor a tensão tangencial atuante.

Segundo Gaspar (2005) o Momento estático é representado pela equação 14:

$$Msx = y_{CG} \times S \quad e\ Msy = x_{CG} \times S \tag{14}$$

Para a seção transversal retangular, foram definidas anteriormente a equação do centróide e da área. Substituindo-as na equação anterior, temos as equações 15.1 e 15.2:

$$Msx_{ret} = \frac{h}{2} \times (b \times h) \rightarrow Msx_{ret} = \frac{b \times h^2}{2} \tag{15.1}$$

$$Msy_{ret} = \frac{b}{2} \times (b \times h) \rightarrow Msy_{ret} = \frac{h \times b^2}{2} \tag{15.2}$$

Para a seção transversal circular, Gaspar (2005) define o Momento estático sendo representado pela equação 16:

$$Msx_{circ} = \frac{D^3}{12} = Msy_{circ} \tag{16}$$

1.9. RAIO DE GIRAÇÃO

Também conhecido como raio de inércia, conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), retrata a distância da faixa concentrada hipotética da área da seção, estreita e paralela a um eixo, obtida de modo que esta faixa tenha o mesmo momento de inércia em relação ao eixo. Como exemplo, Beer e Johnston (1995) apresentam a equação 17 para o cálculo da tensão crítica de flambagem numa barra, que se utiliza do raio de giração (equação 18).

$$\sigma_{CF} = \frac{\pi^2 E}{(L_{FL}/r)^2} \tag{17}$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{S}} \tag{18}$$

Em que:

- E é o módulo de elasticidade do material da estrutura;
- LFL é o comprimento de flambagem da peça;
- r é o raio de giração da seção transversal da peça.

Analisando-se a equação 17, nota-se que, quanto maior o raio de giração, maior a tensão crítica de flambagem, que é a tensão que, se atingida pela tensão

atuante, leva à flambagem da peça. Então, o aumento do raio de giração é favorável ao dimensionamento quanto à flambagem. A equação 18 leva ao comentário de que, quanto maior a relação do momento de inércia sobre a área da seção, maior o raio de giração.

Melconian (2012) apresenta a equação 19 para o raio de giração de uma seção transversal retangular:

$$r_{x_{ret}} = \frac{h \times \sqrt{3}}{6} \quad e \quad r_{y_{ret}} = \frac{b \times \sqrt{3}}{6} \tag{19}$$

Já para a seção transversal circular é a equação 20:

$$r_{x_{circ}} = \frac{D}{4} = r_{y_{circ}} \tag{20}$$

1.10. MÓDULO RESISTENTE

Beer e Johnston (1995) chamam de módulo resistente ou módulo da seção ou módulo resistente elástico da seção transversal a divisão de “I/y” (relação que aparece, por exemplo, na equação 1), mas tomando como y a coordenada máxima (ymáx) em relação ao centróide (equação 21).

$$W = \frac{I}{y_{máx}} \tag{21}$$

$$\sigma_{FSR_{máx}} = \frac{M}{W} \tag{22}$$

Desta forma, a tensão normal atuante máxima, na flexão simples reta, no exemplo, é dada pela equação 22, sendo inversamente proporcional ao módulo resistente, de modo que, por exemplo, uma viga deve ser projetada com o maior valor de W possível.

Melconian (2012) afirma que, para uma seção transversal retangular, o módulo resistente é dado pela equação 23:

$$W_{x_{ret}} = \frac{b \times h^2}{6} \quad e \quad W_{y_{ret}} = \frac{h \times b^2}{6} \tag{23}$$

Já para a seção transversal circular, o mesmo autor apresenta a equação 24:

$$W_{x_{circ}} = \frac{\pi \times D^3}{32} = W_{y_{circ}} \tag{24}$$

1.11. MÓDULO RESISTENTE A TORÇÃO

De acordo com Neto e Costa (2016), uma seção transversal retangular não admite formas fechadas, e seu módulo de resistência e seu momento de inércia podem ser descritos como mostra a equação 25:

$$W_T = c1 \times h \times b^2 \,, \qquad J = c2 \times h \times b^3 \tag{25}$$

O modulo resistente a torção (Wt), vem da equação 12 que mostra o cálculo da tensão de cisalhamento máxima para o caso de uma seção transversal retangular. Os coeficientes c1 e c2 são dados pela Tabela 1. *O J da seção circular já foi deduzido no item 1.5.*

1.12. MÓDULO RESISTENTE PLÁSTICO

O módulo resistente plástico ou módulo de resistência plástico ou módulo resistente da seção plastificada, conforme Beer e Johnston (1995), é dado pela equação 26.

$$Z = \frac{M_p}{\sigma_e} \tag{26}$$

Em que:

- Mp é o momento de plastificação do material da estrutura, em determinada seção transversal;
- σ_e é a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.

Beer e Johnston (1995) exemplificam o caso de uma viga de seção retangular resultando no módulo resistente plástico da equação 27, onde se percebe que o parâmetro se torna essencialmente geométrico.

$$Z_{RET} = \frac{b y_{máx}^2 \sigma_e}{\sigma_e} = \frac{bh^2}{4} \tag{27}$$

Em que:

- b é a largura da seção transversal retangular;
- h é a altura da seção transversal retangular.

O valor de Z pode ser usado, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), para calcular o momento de plastificação (momento atuante a partir do qual a seção entra no regime plástico), invertendo a equação 26, conhecida a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.

Já para seção circular, segundo Guanabara (2010), o módulo resistente plástico é dado pela equação 28:

$$Z_{circ} = \frac{D^3}{6} \tag{28}$$

1.13. FATOR DE FORMA

O fator de forma, segundo Beer e Johnston (1995), é a relação dada pela equação 29.

$$k = \frac{Z}{W} \tag{29}$$

Trata-se de um parâmetro adimensional e, por exemplo, para uma seção retangular como demonstrado a seguir, vale 1,5, conforme Beer e Johnston (1995) e deduzido nas equações 30 e 31.

$$k = \frac{\frac{bh^2}{4}}{\frac{bh^2}{6}} \tag{30}$$

$$k = \frac{bh^2}{4} \times \frac{6}{bh^2} = \frac{4}{6} = 1{,}5 \tag{31}$$

Já para a seção circular vale 1,70, como demonstrado nas equações 32 e 33:

$$k = \frac{\frac{D^3}{6}}{\frac{\pi \times D^3}{32}} \tag{32}$$

$$k = \frac{D^3}{6} \times \frac{32}{\pi \times D^3} = \frac{32}{6 \times \pi} = 1{,}70 \tag{33}$$

1.14. CONSTANTE DE EMPENAMENTO

Guanabara (2010) mostra que o coeficiente de empenamento é uma propriedade geométrica dos perfis relacionada à rigidez ao empenamento transversal.

Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), a constante de empenamento para seção circular é zero, pois na torção, seções circulares não sofrem empenamento. Já para seção retangular, a constante de empenamento não foi encontrada nas bibliografias consultadas.

1.15. MOMENTOS PRINCIPAIS DE INÉRCIA

Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), os momentos principais de inércia e os ângulos de rotação para os eixos relacionados são dados pelas equações 34 e 35, respectivamente, para uma seção de formato genérico.

$$I_{máx,mín} = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \sqrt{\frac{I_x - I_y}{2} + I_{xy}^2} \quad (34)$$

$$\tan 20_m = -\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y} \quad (35)$$

2. PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA PROPRIEDADES DE SEÇÕES TRANSERSAIS

Quanto ao estudo de seções transversais, existem inúmeros programas de computador por exemplo, os listados na Tabela 2.

Tabela 2: Programas já existentes para cálculo de propriedades geométricas de seções transversais.

FONTE	CARACTERÍSTICAS GERAIS	CARACTERÍSTICAS INEXISTENTES QUE SE PRETENDEM COLOCAR NO PROGRAMA DESTE PROJETO
https://engiobra.com/calculadoras/	*On-line*. Faz os cálculos, para várias seções, de momentos de inércia, momento polar de inércia, Centroide, módulo de resistência, raio de giração e área. Apresenta explicações gerais somente sobre os momentos de inércia.	Não desenha em escala a seção cujos dados foram digitados. Na explicação sobre momentos de inércia, não apresenta exemplo de aplicação na engenharia. Não traz explicação sobre os parâmetros, exceto os momentos de inércia.
https://www.tqs.com.br/apps/propgeo/okd328a	calcula propriedades geométricas de seções arbitrárias abertas com paredes delgadas, com ou sem eixos de simetria (desde que construído por segmentos retos). Calcula centroide, centro de cisalhamento, raios de giração, momentos de inércia, módulos elásticos e plásticos, dentre outros.	Não é on-line e necessita de cadastro e login para poder ser baixado. Necessita do programa "Java" instalado no computador. Não desenha em escala a seção cujos dados foram digitados. Não traz explicação sobre os parâmetros nem exemplo de aplicação na engenharia.
https://skyciv.com/pt/free-moment-of-inertia-calculator/	*On-line*, mas com plano gratuito e pago. Somente no plano pago é citado que o programa detalha os cálculos (apresenta as fórmulas). Calcula os parâmetros de várias seções transversais.	No plano gratuito, não traz explicação sobre os parâmetros nem exemplo de aplicação na engenharia. Somente a entrada de dados aparece parcialmente em português. Os resultados são em inglês.
https://optimalbeam.com/section-properties.php	*On-line*. Calcula os parâmetros de várias seções transversais.	Não desenha em escala a seção cujos dados foram digitados. Não traz explicação sobre os parâmetros nem exemplo de aplicação na engenharia. Totalmente em inglês.
https://amesweb.info/section/moment-of-inertia-rectangle.aspx	*On-line*. Calcula os parâmetros de várias seções transversais. Apresenta todas as fórmulas utilizadas	Não desenha em escala a seção cujos dados foram digitados. Não traz exemplos de aplicação dos parâmetros na engenharia. Totalmente em inglês.

	nos cálculos dos parâmetros e uma descrição de seus significados geométricos.	
https://www.engineersedge.com/material_science/section_modulus_12893.htm	*On-line*. Calcula os parâmetros (apenas área, momento de inércia, raio de giração e centroide) de várias seções transversais. Apresenta todas as fórmulas utilizadas nos cálculos dos parâmetros.	Somente para seção retangular permite acesso sem *login premium.* No acesso sem *login premium*, não desenha em escala a seção cujos dados foram digitados e não traz exemplos de aplicação dos parâmetros na engenharia. Totalmente em inglês.
http://cdasap.com/quick-calculators/section-properties-calculator/	*On-line*. Calcula os parâmetros (apenas área, momento de inércia, produto de inércia, raio de giração e centroide) de qualquer seção desenhada por coordenadas dos pontos de suas retas. Apresenta todas as fórmulas utilizadas nos cálculos dos parâmetros.	A entrada de dados somente por coordenadas é trabalhosa para o caso de seções mais simples. Não traz exemplos de aplicação dos parâmetros na engenharia. Totalmente em inglês.

Fonte: indicadas. Acesso a todas as fontes em: 09/11/2021.

DESENVOLVIMENTO, METODOLOGIA E ANÁLISE

A maioria dos programas existentes (exemplos na tabela 2) mostram somente os resultados finais ou alguns passos, deixando uma carência de conteúdo. Pensando nisso, um grupo de pesquisa do qual esse trabalho faz parte, já cadastrado no CNPq tem desenvolvido programas que não só fazem cálculos, mas que demonstram todo o procedimento realizado em relatórios gerados no formato pdf que podem auxiliar professores e alunos.

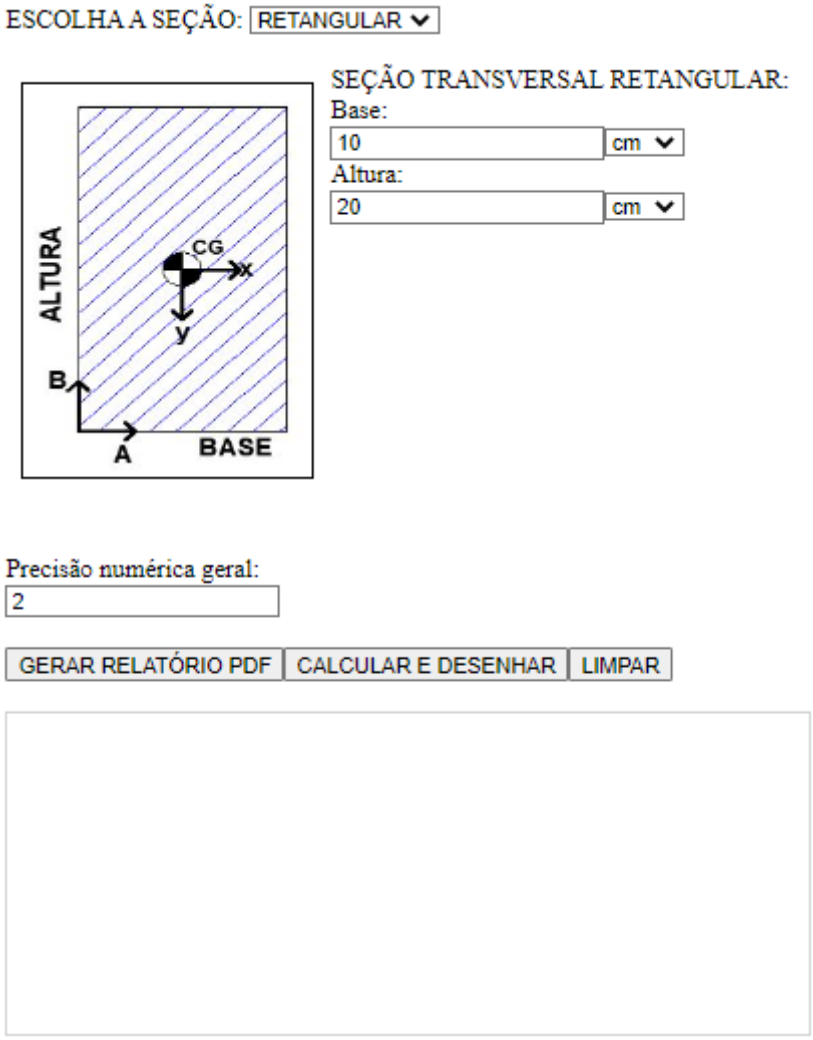
Dessa forma, por meio das linguagens de programação web (HTML/JavaScript), mostra-se aqui o relatório sobre a criação de um programa de computador disponível *on-line* chamado IFSEÇÃO que mostra o desenho em escala, os cálculos e a teoria das propriedades geométricas de seções transversais de elementos estruturais apresentados anteriormente O programa é dividido em módulos, sendo possível a resolução de uma ou mais seções transversais por projeto. Neste projeto, foram desenvolvidas as seções transversais retangulares e circulares.

Dessa forma, a implementação criada segundo a pesquisa de iniciação científica tem a tela inicial apresentada na Figura 3, que é o programa aberto em qualquer navegador da internet e incorporado na página do grupo de pesquisa

NEVE (Núcleo de Engenharia Virtual e Experimental - https://vtp.ifsp.edu.br/nev/ifsecao/ifsecao.html), do qual esse trabalho faz parte.

No caso da Figura 3, a tela apresentada é da seção transversal retangular, sendo composta por campos fixos e editáveis.

Figura 3 – Tela Inicial.



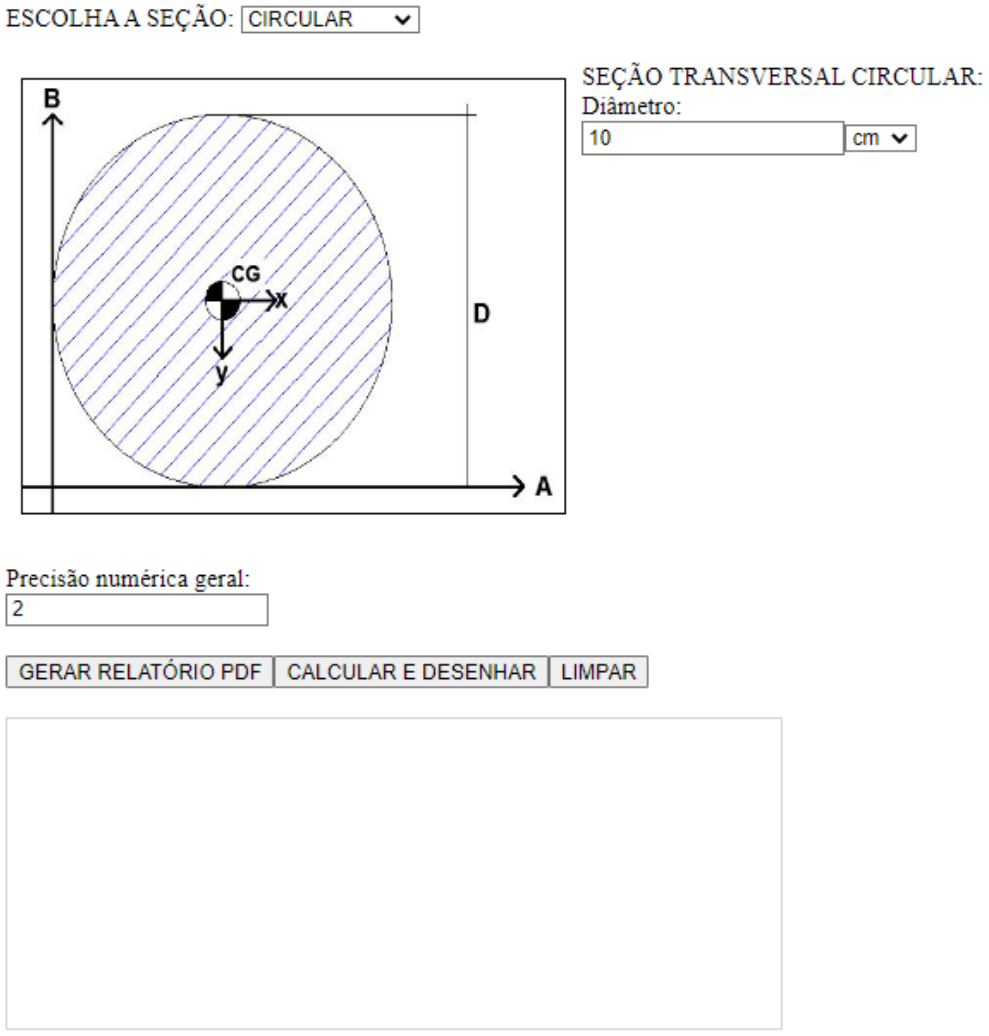
Fonte: O próprio autor (2022)

- Campos editáveis:
  - I- Na seção transversal retangular, são: Base e altura;
  - II- Na seção transversal circular, é: Diâmetro, mostrado na Figura 4.
  - III- Para ambas as seções foi criado o campo “Precisão numérica geral”, que permite que o usuário escolha a precisão numérica dos valores calculados.

IV- O botão “Gerar Relatório PDF” é responsável por gerar o PDF com todos os parâmetros calculados e detalhados. O botão “Calcular e Desenhar” é responsável pela exibição da seção e pela tabela que contém os valores das propriedades. E o botão “Limpar” é responsável por limpar o desenho e a tabela gerados da seção transversal escolhida.

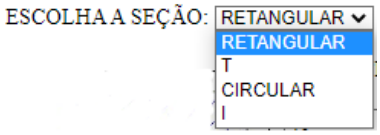
V- O campo “Escolha a seção” permite que o usuário escolha qual seção transversal que ele deseja calcular, estando detalhado na Figura 5.

Figura 4 – Seção transversal circular.



Fonte: O próprio autor (2022)

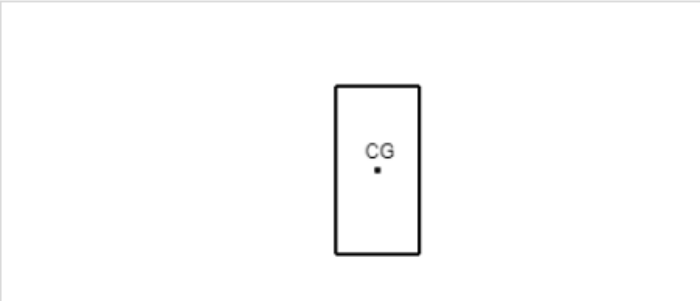
Figura 5 – Aba com opções.



Fonte: O próprio autor (2022)

O elemento Canvas é uma tela gráfica que é responsável por fazer o desenho em escala da seção transversal escolhida inicialmente pelo usuário, por meio do algoritmo desenvolvido. Para um melhor entendimento de como o elemento Canvas funciona, a Figura 6 detalha como é o desenho de uma seção transversal retangular de 10 cm de base e 20 cm de altura, gerado pelo *software* quando o botão “CALCULAR E DESENHAR” é ativado.

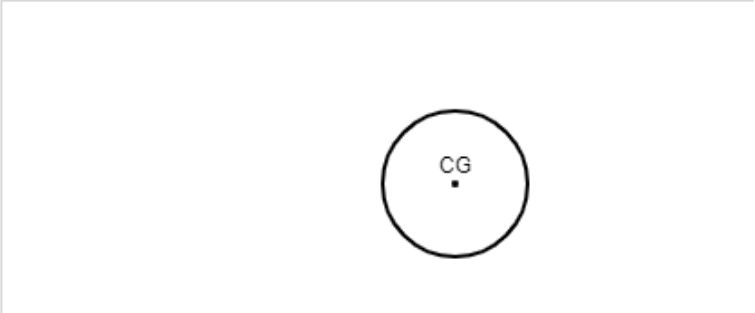
Figura 6 – Resultado do Canvas para seção transversal retangular de 10cmx20cm.



Fonte: O próprio autor (2022)

Já a Figura 7, mostra o resultado do elemento Canvas para uma seção transversal circular de 10cm de diâmetro.

Figura 7 – Resultado do Canvas para seção transversal circular de 10cm de diâmetro.



Fonte: O próprio autor (2022)

Quando o botão “CALCULAR E DESENHAR” é acionado pelo usuário, além de gerar o desenho da seção transversal, o programa gera também a tabela com os valores dos parâmetros calculados.

A Figura 8 mostra a tabela gerada para a seção transversal retangular de 10 cm de base e 20 cm de altura.

Figura 8 – Resultado da tabela para seção transversal retangular de 10cmx20cm.

Propriedades	Resultado	Unidades
Área	200.00	cm^2
A Centro de Gravidade	5.00	cm
B Centro de Gravidade	10.00	cm
A Centro de Torção	5.00	cm
B Centro de Torção	10.00	cm
Ix momento de Inercia	6666.67	cm^4
Iy momento de Inercia	1666.67	cm^4
Coeficiente de Torção c1	0.246	
Coeficiente de Torção c2	0.229	
Ixy Produto de Inercia	0.00	
Msx Momento Estático	2000.00	cm^3
Msy Momento Estático	1000.00	cm^3
ix Raio de Giração	5.77	cm
iy Raio de Giração	2.89	cm
Wx Módulo Resistente	666.67	cm^3
Wy Módulo Resistente	333.33	cm^3
Wt Módulo Resistente a Torção	492.00	cm^3
Momento Polar de Inércia	18320.00	cm^4
Z Módulo Resistente Plastico	1000.00	cm^3
Fator de Forma	1.50	

Fonte: O próprio autor (2022)

A Figura 9 mostra a tabela gerada para a seção transversal circular de 10 cm de diâmetro.

Figura 9 – Resultado da tabela para seção transversal circular de 10cm de diâmetro.

Propriedades	Resultado	Unidades
Área	78.54	cm^2
A Centro de Gravidade	5.00	cm
B Centro de Gravidade	5.00	cm
A Centro de Torção	5.00	cm
B Centro de Torção	5.00	cm
Ix Momento de Inercia	490.87	cm^4
Iy Momento de Inercia	490.87	cm^4
Momento Polar de Inercia	981.75	cm^4
Ixy Produto de Inercia	0.00	
Msx Momento Estático	83.33	cm^3
Msy Momento Estático	83.33	cm^3
rx Raio de Giração	2.50	cm
ry Raio de Giração	2.50	cm
Wx Modulo Resistente	98.17	cm^3
Wy Modulo Resistente	98.17	cm^3
Z Modulo Resistente Plastico	166.67	cm^3
Fator de forma	1.70	
Constante de Empenamento	0.00	

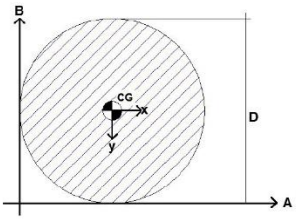
Fonte: O próprio autor (2022)

O botão “GERAR PDF”, quando acionado, gera um relatório no formato pdf (*portable document format*) que contém a rotina de cálculo dos parâmetros mencionados anteriormente, para as seções transversais retangulares e circulares, como mostram as Figura 10 e 11, que são os relatórios pdf gerado para uma seção transversal circular de 10cm de diâmetro e para uma seção transversal retangular de 10 cm de base e 20 cm de altura.

Figura 10 – Resultado do relatório pdf para seção transversal circular de 10cm de diâmetro.

NEV: Núcleo de Engenharia Virtual
Título: Programa On-line para cálculo e estudo de propriedades geométricas de seções transversais retangulares e circulares
Autor: Maria Eduarda dos Santos Aguiar
Orientador: Prof. Gustavo Cabrelli Nirschl
Tipo: Iniciação Científica com Bolsa Institucional
Curso: Engenharia Civil
Data da versão original: 30/11/2022
Data da última atualização: 30/11/2022
Data da geração do relatório: 29/11/2022

CÁLCULO DE PROPRIEDADES DE SEÇÕES



Como exemplo:
Diâmetro: D = 10.00 cm

Área
Dependendo da forma da seção transversal, pode-se calcular sua área total subdividindo-a em retângulos ou círculos, cujas áreas são classicamente determinadas.
Conforme Beer e Johnston (1995), num elemento estrutural linear submetido a ação axial, a área da seção transversal é aplicada no cálculo da tensão normal atuante, dada pela equação a seguir.

$$\sigma_{Axial} = \frac{F}{S}$$

Em que:
F é a força axial atuante.
Sendo assim, quanto maior a área da seção transversal (S), menor a tensão atuante no caso de ação axial.
Para calcular a área de uma seção transversal circular é segundo Melconian (2012) a equação a seguir, onde D é o diâmetro da seção transversal circular:
S = (π×D^2)/4
Temos:
S = (π ×10.00²)/4 = 78.54 cm^2

Centróide
Segundo CESAD (2021), o centróide é o ponto no interior de uma forma geométrica que define seu centro geométrico. É importante definir ainda outros parâmetros que podem se relacionar com o centróide: o centro de massa é o ponto onde pode ser pensado que toda a massa do corpo está concentrada para o

cálculo de vários efeitos. O centróide, o centro de gravidade e o centro de massa coincidem quando a estrutura tem peso específico e espessura constante, ou seja, quando é constituída de um só material homogêneo.
Conforme Beer e Johnston (1995), na flexão simples reta de uma estrutura linear, o eixo neutro passa pelo centróide da seção transversal.
Segundo Melconian (2012), no caso da seção transversal circular, o centróide está representado pela equação abaixo (considerando a origem no canto inferior esquerdo, :
ACg = BCg = D/2
A Centro de Gravidade = 10.00 / 2 = 5.00 cm
B Centro de Gravidade = 10.00 / 2 = 5.00 cm

Centro de Torção
O centro de torção (ou centro de cisalhamento ou centro de cortante) é tal que, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), qualquer esforço cortante que passe por ele não produzirá momento torçor na seção transversal. Para seções transversais simétricas, coincide com o centro de gravidade.
Como a seção transversal circular é simétrica, para o cálculo de centro de torção a equação é a mesma do Centróide.
Portanto:
Ator = Btor = D/2
Temos:
A Centro de Torção = 10.00 / 2 = 5.00 cm
B Centro de Torção = 10.00 / 2 = 5.00 cm

Momento de Inércia
O momento de inércia (também chamado de momento de inércia axial) é uma característica geométrica da seção transversal que contribui para se medir a resistência ao tombamento (ou à deformação) em relação a um eixo de uma barra e aparece, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), na equação a seguir:

$$\sigma_{FSR} = \frac{M}{I} * y$$

Portanto, quanto maior o momento de inércia, menor a tensão atuante no caso de flexão simples reta.
Segundo Melconian (2012), no caso de seção transversal circular usa a equação abaixo em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade:
Jx = (π × D^4)/64 = Jy
Temos:
J Centro de Torção x = (π × 10.00^4) / 64 = 490.87 cm^4
J Centro de Torção y = (π × 10.00^4) / 64 = 490.87 cm^4

Momento Polar de Inércia
Também chamado de momento de inércia à torção, é, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), uma caraterística importante nos problemas relativos à torção. Beer e Johnston (1995) exemplificam, no problema da torção pura numa barra circular, o cálculo da tensão cisalhante atuante como:

$$\tau_{TOR} = \frac{T}{J}\rho$$

Em que:
- T é a o momento torçor atuante na seção transversal;
- ρ é a distância a partir do eixo da barra, na seção transversal;
- J é o momento polar de inércia.

Analisando-se a equação acima, quanto maior o momento polar de inércia, menor a tensão cisalhante atuante no caso de torção pura numa seção circular.
Beer e Johnston (1995) afirmam que o momento polar de inércia de uma seção transversal circular é dado pela equação:
J = (π×R^4)/2 = π/2×(D/2)^4 = (π×D^4)/32
Temos:
J Momento Polar de Inércia = (π ×10.00^4) / 32 = 981.75 cm^4

Produto de Inércia
Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), o produto de inércia mede a anti-simetria da distribuição de massa de um corpo em relação a um par de eixos com origem em seu baricentro.
Segundo Melconian (2012), para a seção transversal circular, o produto de inércia é dado por:
Jxy = 0
Temos:
Jxy Produto de Inércia = 0.00

Momento Estático
O momento estático (Ms) aparece, em exemplos de Beer e Johnston (1995) sobre o cálculo da tensão cisalhante atuante no caso da flexão simples reta, dado pela equação a seguir:

$$\tau_{FSR} = \frac{V*Ms}{I*b}$$

Assim, fisicamente, quanto maior a simetria de uma seção, menor o momento estático e, por consequência, menor a tensão tangencial atuante.
Segundo Gaspar (2005) o Momento estático é representado pela equação abaixo:

$$Msx = y_{CG} \times S \quad e \; Msy = x_{CG} \times S$$

Para a seção transversal circular, Gaspar (2005) define o Momento estático sendo representado pela equação:
Msx = D³ / 12 = Msy
Temos:
Ms Centro Estático x = 10.00³ / 12 = 83.33 cm^3
Ms Centro Estático y = 10.00³ / 12 = 83.33 cm^3

Raio de Giração
Também conhecido como raio de inércia, conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011) retrata a distância

da faixa concentrada hipotética da área da seção, estreita e paralela a um eixo, obtida de modo que esta faixa tenha o mesmo momento de inércia em relação ao eixo. Como exemplo, Beer e Johnston (1995) apresentam para o cálculo da tensão crítica de flambagem numa barra, a equação a seguir:

$$\sigma_{CF} = \frac{\pi^2 E}{(L_{FL}/r)^2}$$

Em que:
- E é o módulo de elasticidade do material da estrutura;
- LFL é o comprimento de flambagem da peça;
- r é o raio de giração da seção transversal da peça.

Equação da qual se utiliza do raio de giração, representado pela equação:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Analisando-se a equação para o cálculo da tensão crítica de flambagem numa barra, nota-se que, quanto maior o raio de giração, maior a tensão crítica de flambagem, que é a tensão que, se atingida pela tensão atuante, leva à flambagem da peça. Então, o aumento do raio de giração é favorável ao dimensionamento quanto à flambagem.
A equação do raio de giração mostra que, quanto maior a relação do momento de inércia sobre a área da seção, maior o raio de giração.
Melconian (2012) apresenta o raio de giração de uma seção transversal circular sendo:
ix = D / 4 = iy
Temos:
rx Raio de giração x = 10.00 / 4 = 2.50 cm
ry Raio de giração y = 10.00 / 4 = 2.50 cm

Módulo Resistente
Beer e Johnston (1995) chamam de módulo resistente ou módulo da seção ou módulo resistente elástico da seção transversal a divisão de "I/y" porem, como y como sendo a coordenada máxima (ymáx) em relação ao centroide, tem se:

$$W = \frac{I}{y_{máx}}$$

Desta forma, a tensão normal atuante máxima, na flexão simples reta, no exemplo, é dada pela equação a seguir, sendo inversamente proporcional ao módulo resistente, de modo que, por exemplo, uma viga deve ser projetada com o maior valor de W possível.

$$\sigma_{FSR_{máx}} = \frac{M}{W}$$

Melconian (2012) afirma que, para uma seção transversal circular, o Módulo Resistente é dado pela seguinte equação:
Wx = (π×D³) / 32 = Wy
Temos:
Wx Módulo Resistente x = (π × 10.00³) / 32 = 98.17 cm^3

Wy Módulo Resistente y = (π × 10.00³) / 32 = 98.17 cm^3

Módulo Resistente Plástico
O módulo resistente plástico ou módulo de resistência plástico ou módulo resistente da seção plastificada, conforme Beer e Johnston (1995), é dado pela equação:

$$Z = \frac{M_p}{\sigma_e}$$

Em que:
- Mp é o momento de plastificação do material da estrutura, em determinada seção transversal;

σe é a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.
O valor de Z pode ser usado, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), para calcular o momento de plastificação (momento atuante a partir do qual a seção entra no regime plástico), invertendo a equação acima, conhecida a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.
Para seção circular, segundo Guanabara (2010), o módulo resistente plástico é dado pela equação:
Z = D³/6
Temos:
Z Módulo Resistente Plástico = 10.00³ / 6 = 166.67 cm^3

Fator de Forma
O fator de forma, segundo Beer e Johnston (1995), é a relação dada pela equação:

$$k = \frac{Z}{W}$$

Trata-se de um parâmetro adimensional e, por exemplo, para uma seção circular como demonstrado a seguir, vale 1,70.

$$k = \frac{\frac{D^3}{6}}{\frac{\pi \times D^3}{32}}$$

$$k = \frac{D^3}{6} \times \frac{32}{\pi \times D^3} = \frac{32}{6 \times \pi} = 1{,}70$$

Constante de Empenamento
Guanabara (2010) mostra que o coeficiente de empenamento é uma propriedade geométrica dos perfis relacionada à rigidez ao empenamento transversal.
Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), a constante de empenamento para seção circular é zero, pois na torção, seções circulares não sofrem empenamento.
Constante de empenamento = 0.00

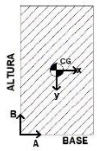
Fonte: O próprio autor (2022)

Figura 11 – Resultado do relatório pdf para seção transversal retangular de 10cmx20cm.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA SÃO PAULO
Campus Votuporanga

NEV: Núcleo de Engenharia Virtual
Título: Programa On-line para cálculo e estudo de propriedades geométricas de seções transversais retangulares e circulares
Autor: Maria Eduarda dos Santos Aguiar
Orientador: Prof. Gustavo Cabrelli Nirschl
Tipo: Iniciação Científica com Bolsa Institucional
Curso: Engenharia Civil
Data da versão original: 30/11/2022
Data da última atualização: 30/11/2022
Data da geração do relatório: 29/11/2022

CÁLCULO DE PROPRIEDADES DE SEÇÕES



Como exemplo:
Base: b = 10.00 cm
Altura: h = 20.00 cm

Área
Dependendo da forma da seção transversal, pode-se calcular sua área total subdividindo-a em retângulos ou círculos, cujas áreas são classicamente determinadas.
Conforme Beer e Johnston (1995), num elemento estrutural linear submetido a ação axial, a área da seção transversal é aplicada no cálculo da tensão normal atuante, dada pela equação a seguir.

$$\sigma_{Axial} = \frac{F}{S}$$

Em que:
F é a força axial atuante.
Sendo assim, quanto maior a área da seção transversal (S), menor a tensão atuante no caso de ação axial.
Para calcular a área de uma seção transversal retangular é segundo Melconian (2012) a equação a seguir, onde b é a base e h é a altura da seção transversal retangular:
S= b×h
Temos:
S =10.00 × 20.00 = 200.00 cm^2

Centróide
Segundo CESAD (2021), o centróide é o ponto no interior de uma forma geométrica que define seu centro geométrico. É importante definir ainda outros parâmetros que podem se relacionar com o centróide: o centro de massa é o ponto onde pode ser pensado que toda a massa do corpo está concentrada para o cálculo de vários efeitos. O centróide, o centro de gravidade e o centro de massa coincidem quando a

estrutura tem peso específico e espessura constante, ou seja, quando é constituída de um só material homogêneo.
Conforme Beer e Johnston (1995), na flexão simples reta de uma estrutura linear, o eixo neutro passa pelo centróide da seção transversal.
Segundo Melconian (2012), no caso da seção transversal circular, o centróide está representado pela equação abaixo (considerando a origem no canto inferior esquerdo):
ACg = b/2
BCg = h/2
Temos:
A Centro de Gravidade = 10.00 / 2 = 5.00 cm
B Centro de Gravidade = 20.00 / 2 = 10.00 cm

Centro de Torção
O centro de torção (ou centro de cisalhamento ou centro de cortante) é tal que, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), qualquer esforço cortante que passe por ele não produzirá momento torçor na seção transversal. Para seções transversais simétricas, coincide com o centro de gravidade.
Como a seção transversal retangular é simétrica, para o cálculo de centro de torção a equação é a mesma do Centróide.
Portanto:
Ator = b/2
Btor = a/2
Temos:
A Centro de Torção = 10.00 / 2 = 5.00 cm
B Centro de Torção = 20.00 / 2 = 10.00 cm

Momento de Inércia
O momento de inércia (também chamado de momento de inércia axial) é uma característica geométrica da seção transversal que contribui para se medir a resistência ao tombamento (ou à deformação) em relação a um eixo de uma barra e aparece, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), na equação a seguir:

$$\sigma_{FSR} = \frac{M}{I} * y$$

Portanto, quanto maior o momento de inércia, menor a tensão atuante no caso de flexão simples reta.
Segundo Melconian (2012), no caso de seção transversal retangular usa a equação abaixo em relação ao eixo que passa pelo centro de gravidade:
Jx = (b × h³)/12
Jy = (h × b³)/12
Temos:
J Centro de Torção x = (10.00 × 20.00³) / 12 = 6666.67 cm^4
J Centro de Torção y = (20.00 × 10.00³) / 12 = 1666.67 cm^4

Coeficientes de Torção para Seções Não-Circulares
Beer e Johnston (1995) afirmam que os cálculos de tensões cisalhantes de torção em seções transversais não circulares são complexos e dependem da teoria da elasticidade. Os autores apresentam a seguir como exemplo do cálculo da tensão de cisalhamento máxima para o caso de uma seção transversal retangular.

$$\tau_{máx,tor,ret} = \frac{T}{c_1 a b^2}$$

Em que:
- c1 é um coeficiente de torção dado pela Tabela 1;
- a: maior dimensão da seção transversal;
- b: menor dimensão da seção transversal.

Conforme Beer e Johnston (1995), o coeficiente de torção (c1) para uma seção não-circular é dado na Tabela 1:

Tabela 1: Coeficientes de torção para seções não circulares

a/b	c_1	c_2
1,0	0,208	0,1406
1,2	0,219	0,1661
1,5	0,231	0,1958
2,0	0,246	0,229
2,5	0,258	0,249
3,0	0,267	0,263
4,0	0,282	0,281
5,0	0,291	0,291
10,0	0,312	0,312
∞	0,333	0,333

Fonte: Beer e Johnston (1995)

NaN
Primeiramente devemos analisar a / b:
a / b = 20.00 / 10.00 = 2.00

Como a / b = 2.00, analisando a Tabela 1 temos que c1 = 0.246 e o nosso c2 = 0.229.

Produto de Inércia
Conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011), o produto de inércia mede a anti-simetria da distribuição de massa de um corpo em relação a um par de eixos com origem em seu baricentro.
Segundo Melconian (2012), para a seção transversal retangular, o produto de inércia é dado por:
Jxy = 0
Temos:
Jxy Produto de Inércia = 0.00

Momento Estático
O momento estático (Ms) aparece, em exemplos de Beer e Johnston (1995) sobre o cálculo da tensão cisalhante atuante no caso da flexão simples reta, dado pela equação a seguir:

$$\tau_{FSR} = \frac{V * Ms}{I * b}$$

Assim, fisicamente, quanto maior a simetria de uma seção, menor o momento estático e, por consequência, menor a tensão tangencial atuante.
Segundo Gaspar (2005) o Momento estático é representado pela equação abaixo:

$$Msx = y_{CG} \times S \quad e \; Msy = x_{CG} \times S$$

Para a seção transversal retangular, foram definidas anteriormente a equação do centróide e da área. Substituindo-as na equação anterior, temos as equações:
Msx = (h / 2)×(b × h) -> Msx = (b × h²)/2
Msx = (b / 2)×(b × h) -> Msx = (h × b²)/2
Temos:
Ms Centro Estático x = (10.00 × 20.00²) / 2 = 2000.00 cm^3
Ms Centro Estático y = (20.00 × 10.00²) / 2 = 2000.00 cm^3

Raio de Giração
Também conhecido como raio de inércia, conforme Beer, Johnston e Eisenberg (2011) retrata a distância da faixa concentrada hipotética da área da seção, estreita e paralela a um eixo, obtida de modo que esta faixa tenha o mesmo momento de inércia em relação ao eixo. Como exemplo, Beer e Johnston (1995) apresentam para o cálculo da tensão crítica de flambagem numa barra, a equação a seguir:

$$\sigma_{CF} = \frac{\pi^2 E}{(L_{FL}/r)^2}$$

Em que:
- E é o módulo de elasticidade do material da estrutura;
- LFL é o comprimento de flambagem da peça;
- r é o raio de giração da seção transversal da peça.

Equação da qual se utiliza do raio de giração, representado pela equação:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Analisando-se a equação para o cálculo da tensão crítica de flambagem numa barra, nota-se que, quanto maior o raio de giração, maior a tensão crítica de flambagem, que é a tensão que, se atingida pela tensão atuante, leva à flambagem da peça. Então, o aumento do raio de giração é favorável ao dimensionamento quanto à flambagem.
A equação do raio de giração mostra que, quanto maior a relação do momento de inércia sobre a área da seção, maior o raio de giração.
Melconian (2012) apresenta o raio de giração de uma seção transversal retangular sendo:
rx = (h × √3) / 6
ry = (b × √3) / 6
Temos:
rx Raio de giração x = (20.00 × √3) / 6 = 5.77cm

ry Raio de giração y = (10.00 × √3) / 6 = 2.89cm

Módulo Resistente
Beer e Johnston (1995) chamam de módulo resistente ou módulo da seção ou módulo resistente elástico da seção transversal a divisão de "I/y" porem, como y como sendo a coordenada máxima (ymáx) em relação ao centroide, tem se:

$$W = \frac{I}{y_{máx}}$$

Desta forma, a tensão normal atuante máxima, na flexão simples reta, no exemplo, é dada pela equação a seguir, sendo inversamente proporcional ao módulo resistente, de modo que, por exemplo, uma viga deve ser projetada com o maior valor de W possível.

$$\sigma_{FSR_{máx}} = \frac{M}{W}$$

Melconian (2012) afirma que para uma seção transversal retangular o Módulo Resistente é dado pelas equações:
Wx = (b × h²) / 6
Wy = (h × b²) / 6
Temos:

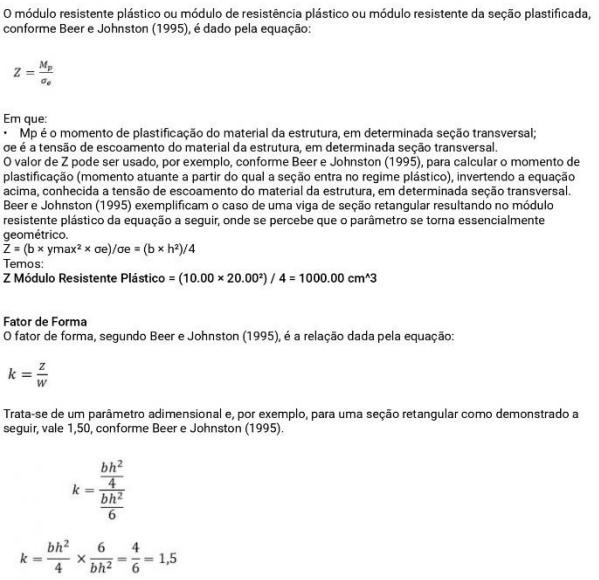
Módulo Resistente
De acordo com Neto e Costa (2016), uma seção transversal retangular não admite formas fechadas, e seu módulo de resistência e seu momento de inércia podem ser descritos como mostra as equações:
Wt = c1 × h × b^2 e J = c1 × h × b^3
O modulo resistente a torção (Wt), vem da equação do cálculo da tensão de cisalhamento máxima para o caso de uma seção transversal retangular. Os coeficientes c1 e c2 são dados pela Tabela 1.
Também chamado de momento de inércia à torção, é, segundo Beer, Johnston e Eisenberg (2011), uma caraterística importante nos problemas relativos à torção. Beer e Johnston (1995) exemplificam, no problema da torção pura numa barra circular, o cálculo da tensão cisalhante atuante como:

$$\tau_{TOR} = \frac{T}{J}\rho$$

Em que:
- T é a o momento torçor atuante na seção transversal;
- ρ é a distância a partir do eixo da barra, na seção transversal;
- J é o momento polar de inércia.

Analisando-se a equação acima, quanto maior o momento polar de inércia, menor a tensão cisalhante atuante no caso de torção pura numa seção circular.
Como mostrado anteriormente, o momento polar de inércia para uma seção transversal retangular é:
J = c1 × h × b^3
Temos:
J Momento Polar de Inércia =0.246 × 20.00 × 10.00^3 = 18320.00 cm^4

Módulo Resistente Plástico



O módulo resistente plástico ou módulo de resistência plástico ou módulo resistente da seção plastificada, conforme Beer e Johnston (1995), é dado pela equação:

$$Z = \frac{M_p}{\sigma_e}$$

Em que:
- Mp é o momento de plastificação do material da estrutura, em determinada seção transversal;

σe é a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.
O valor de Z pode ser usado, por exemplo, conforme Beer e Johnston (1995), para calcular o momento de plastificação (momento atuante a partir do qual a seção entra no regime plástico), invertendo a equação acima, conhecida a tensão de escoamento do material da estrutura, em determinada seção transversal.
Beer e Johnston (1995) exemplificam o caso de uma viga de seção retangular resultando no módulo resistente plástico da equação a seguir, onde se percebe que o parâmetro se torna essencialmente geométrico.
Z = (b × ymax² × σe)/σe = (b × h²)/4
Temos:
Z Módulo Resistente Plástico = (10.00 × 20.00²) / 4 = 1000.00 cm^3

Fator de Forma
O fator de forma, segundo Beer e Johnston (1995), é a relação dada pela equação:

$$k = \frac{Z}{W}$$

Trata-se de um parâmetro adimensional e, por exemplo, para uma seção retangular como demonstrado a seguir, vale 1,50, conforme Beer e Johnston (1995).

$$k = \frac{\frac{bh^2}{4}}{\frac{bh^2}{6}}$$

$$k = \frac{bh^2}{4} \times \frac{6}{bh^2} = \frac{4}{6} = 1{,}5$$

6 de 6

Fonte: O próprio autor (2022)

CONCLUSÃO (RESULTADOS DA PESQUISA)

Os resultados obtidos estão de acordo com as expectativas previstas pelo cronograma inicial, visto que o programa *on-line* IFSEÇÃO apresenta resultados satisfatórios para os cálculos de propriedades geométricas das seções transversais retangulares e circulares, o *software* cumpre seu objetivo de auxiliar no entendimento das rotinas computacionais dessas propriedades alcançado por meio de um relatório em pdf, ficando com seu uso disponível para professores, alunos e profissionais. Especialmente os professores podem utilizar o software para tornar as aulas e conteúdos mais próximos à aplicação computacional pelos estudantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEER, F. P., JOHNSTON, E. R., EISENBERG, E. R. **Mecânica vetorial para engenheiros** - Estática. 9 ª ed. McGraw Hill. São Paulo, 2011.

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.Jr. **Resistência dos materiais.** 3.ed. Makron Books. São Paulo, 1995.

CESAD. CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR A DISTÂNCIA (ed.). **Centróide, centro gravidade e centro de massa de um corpo.** *In*: **CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR A DISTÂNCIA**. [*S. l.*], 8 jan. 2021. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalago/15254715102012Instrumentacao_para_o_Ensino_de_Fisica_I_Aula_2.pdf. Acesso em: 8 nov. 2021.

GASPAR, Ricardo. **Mecânica dos Materiais.** Notas de aula da disciplina Resistência dos Materiais (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Nove de Julho. São Paulo. 2005.

GUANABARA, Matheus Kerkhoff. **DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS METÁLICAS: ROTINA COMPUTACIONAL PARA SELEÇÃO DE PERFIS METÁLICOS**. 2010. Trabalho de Diplomação (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28583/000769204.pdf. Acesso em: 12 maio 2022.

MELCONIAN, S. **Mecânica técnica e resistência dos materiais.** 19. ed. São Paulo: Érica, 2012.

NETO, Edgard S. de Almeida; COSTA, Henrique de Britto. **Tensões tangenciais na torção uniforme** - Escola Politécnica da USP, 2016.

SALES, José Jairo de. *et. al.***Sistemas Estruturais** – Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC-USP. São Carlos, 2005.

Assinatura do orientador:_____

Assinatura do bolsista:_____ Maria Eduarda dos S. Aguiar _____

Prof. Gustavo Cabrelli Nirschl

CPF 286.773.208-57