



# Propriedades mecânicas

Tutorial SectionPro — Seção quadrada, circular vazada e parede em L

BridgeKernel · 2026

## Introdução

As propriedades mecânicas de uma seção — área, momentos de inércia, centro de gravidade, constante de torção, áreas de cisalhamento — são o ponto de partida de todo cálculo estrutural. Este artigo mostra como obtê-las com o **SectionPro**, em três geometrias diferentes:

1. **Seção quadrada** — caso mais simples, todas as propriedades são calculáveis analiticamente.
2. **Seção circular vazada** — a torção e a inércia permanecem analíticas, mas as áreas de cisalhamento exigem um cálculo numérico.
3. **Parede em L** — somente as propriedades geométricas são analíticas. A torção, o cisalhamento e o empenamento são puramente numéricos. Esta seção ilustra o caso de uma geometria assimétrica ( $\alpha \neq 0$ ).

## Propriedades calculadas

O SectionPro calcula as seguintes propriedades. Os três primeiros grupos são calculados para a seção bruta, líquida (dedução dos vazios nos locais das armaduras) e homogeneizada (consideração das armaduras por meio do coeficiente de equivalência  $n$ ):

### Resultados gerais

$A$  — Área  
 $(z_G, y_G)$  — Centro de gravidade  
 $P$  — Perímetro  
 $W$  — Peso linear

### Referencial central

$I_{zz}, I_{yy}$  — Momentos de inércia  
 $v^+, v^-$  — Fibras extremas ( $y$ )  
 $w^+, w^-$  — Fibras extremas ( $z$ )

### Referencial principal

$\alpha$  — Ângulo de rotação  
 $I_1, I_2$  — Inércias principais  
 $v^+, v^-, w^+, w^-$  — Fibras extremas

### Torção e cisalhamento (MEF)

$J$  — Constante de torção  
 $A_{sy}, A_{sz}$  — Áreas de cisalhamento  
 $(y_T, z_T)$  — Centro de cisalhamento  
 $\Gamma$  — Constante de empenamento

As propriedades de torção e cisalhamento exigem a resolução de uma equação diferencial pelo método dos elementos finitos.

# Seção quadrada

## Dados

### Concreto

Lado  $a = 2.0$  m

Massa específica  $\rho = 2.5$  t/m<sup>3</sup>

### Armaduras

HA25 espaçamento 200 mm, cobrimento 50 mm

1 camada — coeficiente de equivalência  $n = 5$

## Entrada de dados e resultados

**Data**

Solid Square Section

**Concrete**

Side length (m)

2

**Reinforcement**

Mode: uniform spacing

Bar spacing (mm) 200 Bar diameter (mm) 25 Concrete cover (mm) 50 Layers (1 or 2) 1

Submit Infos

Figura 1: Entrada de dados da seção quadrada.

**Analysis**

Mechanical characteristics

Specify the equivalence coefficient  $n=Es/Ec$  for homogenized properties and the mesh refinement for torsion and shear computations.

$n = Es/Ec$  5 Mesh refinement Fine

Compute Export

**Section drawing**

**General results**

The area A, perimeter P, weight per linear meter W and the coordinates of the center of gravity (zG, yG) are given below:

| Cara | Unit           | Raw     | Net    | Homog. |
|------|----------------|---------|--------|--------|
| A    | m <sup>2</sup> | 4.0000  | 3.9823 | 4.0707 |
| zG   | m              | 1.0000  | 1.0000 | 1.0000 |
| yG   | m              | 1.0000  | 1.0000 | 1.0000 |
| P    | m              | 8.0000  | —      | —      |
| W    | T/m            | 10.0000 | —      | —      |

Figura 2: Página de resultados das propriedades mecânicas.

Pela dupla simetria, o centro de gravidade está no centro do quadrado, o ângulo principal é nulo e os dois momentos de inércia são iguais.

## Resultados gerais

|                | Unidade        | Bruta   | Líquida | Hom.   |
|----------------|----------------|---------|---------|--------|
| A              | m <sup>2</sup> | 4.0000  | 3.9823  | 4.0707 |
| z <sub>G</sub> | m              | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000 |
| y <sub>G</sub> | m              | 1.0000  | 1.0000  | 1.0000 |
| P              | m              | 8.0000  | —       | —      |
| W              | T/m            | 10.0000 | —       | —      |

## Flexão

### 3.2.2.1 Referencial central

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_{zz}$ | m <sup>4</sup> | 1.3333 | 1.3226       | 1.3761 |
| $I_{yy}$ | m <sup>4</sup> | 1.3333 | 1.3226       | 1.3761 |
| $v^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $v^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |

### 3.2.2.2 Referencial principal

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_1$    | m <sup>4</sup> | 1.3333 | 1.3226       | 1.3761 |
| $I_2$    | m <sup>4</sup> | 1.3333 | 1.3226       | 1.3761 |
| $v^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $v^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $\alpha$ | °              | 0.00   | 0.00         | 0.00   |

## Torção e cisalhamento (MEF)

Pela dupla simetria, o centro de cisalhamento coincide com o centro de gravidade ( $y_T = z_T = y_G = z_G = 1.0$  m). O empenamento é praticamente nulo ( $\Gamma \approx 0$ ). A relação  $A_{sz}/A = 3.33/4.00 \approx 0.83$ , típica de uma seção maciça.

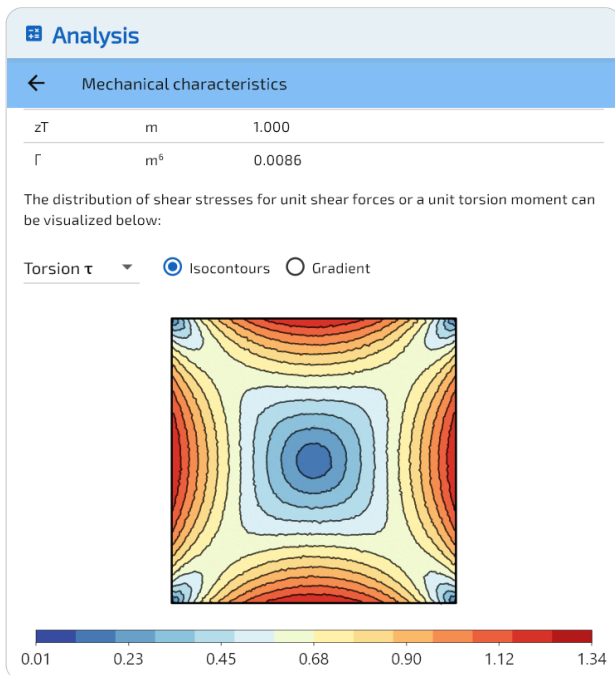


Figura 3: Tensões de torção  $\tau$  — máximo no meio dos lados.

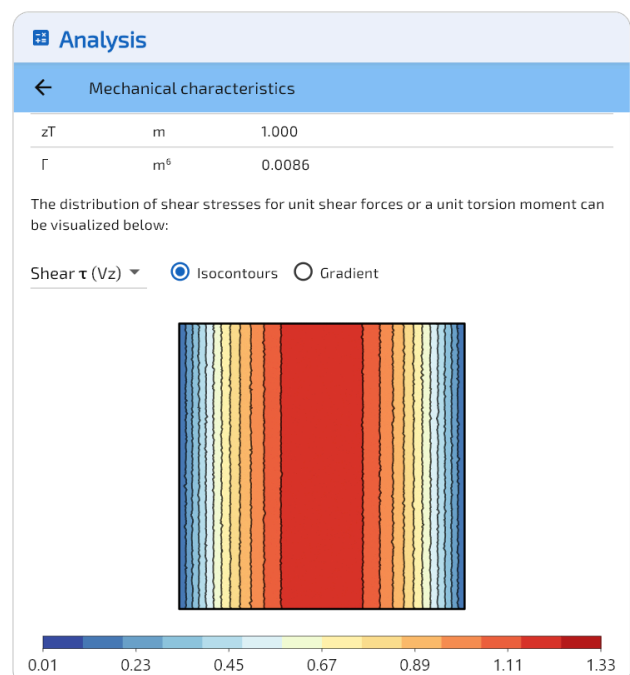


Figura 4: Tensões de cisalhamento.

|         | $J$            | $A_{sz}$       | $A_{sy}$       | $y_T$  | $z_T$  | $\Gamma$       |
|---------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------------|
| Unidade | m <sup>4</sup> | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | m      | m      | m <sup>6</sup> |
| Valor   | 2.2492         | 3.3333         | 3.3333         | 1.0000 | 1.0000 | 0.0086         |

# Seção circular vazada

## Dados

### Concreto

Diâmetro externo  $D = 2.0$  m  
 Espessura da parede  $e = 0.3$  m  
 Massa específica  $\rho = 2.5$  t/m<sup>3</sup>

### Armaduras

24 HA20, cobrimento 50 mm  
 1 camada — coeficiente de equivalência  $n = 5$

## Entrada de dados e resultados

**Data**  
 Hollow Circular Section

**Concrete**  
 Outer diameter (m): 2.0  
 Wall thickness (m): 0.3

**Reinforcement**  
 Mode: count  
 Number of rebars: 24  
 Bar diameter (mm): 20  
 Concrete cover (mm): 50  
 Layers (1 or 2): 1

Submit    Infos

Figura 5: Entrada de dados da seção circular vazada.

**Analysis**  
 Mechanical characteristics

**General results**  
 The area A, perimeter P, weight per linear meter W and the coordinates of the center of gravity (zG, yG) are given below:

| Cara | Unit           | Raw    | Net    | Homog. |
|------|----------------|--------|--------|--------|
| A    | m <sup>2</sup> | 1.6022 | 1.5871 | 1.6625 |
| zG   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |
| yG   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |
| P    | m              | 6.283  | -      | -      |
| W    | T/m            | 4.005  | -      | -      |

*zG and yG are given respectively with respect to the extreme fiber on the left and at the bottom of the section.*

**Centroidal reference frame**  
 The central reference frame is positioned at the center of gravity of the gross section. The z-axis is horizontal, oriented to the right and the y-axis is vertical, oriented upwards.

The moments of inertia Izz and Iyy, as well as the distances of the extreme fibers at the top (v+), at the bottom (v-), to the right (w+) and to the left (w-) with respect to this reference frame are given below:

| Cara | Unit           | Raw    | Net    | Homog. |
|------|----------------|--------|--------|--------|
| Izz  | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913 | 0.6189 |
| Iyy  | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913 | 0.6189 |
| v+   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |
| v-   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |
| w+   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |
| w-   | m              | 1.000  | 1.000  | 1.000  |

Figura 6: Página de resultados das propriedades mecânicas.

Pela simetria circular, as inércias são iguais e o ângulo principal é indeterminado (exibido como 0°).

## Resultados gerais

|                | Unidade        | Bruta  | Líquida | Hom.   |
|----------------|----------------|--------|---------|--------|
| A              | m <sup>2</sup> | 1.6022 | 1.5871  | 1.6625 |
| z <sub>G</sub> | m              | 1.0000 | 1.0000  | 1.0000 |
| y <sub>G</sub> | m              | 1.0000 | 1.0000  | 1.0000 |
| P              | m              | 6.2832 | —       | —      |
| W              | T/m            | 4.0055 | —       | —      |

## Flexão

### 4.2.2.1 Referencial central

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_{zz}$ | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913       | 0.6189 |
| $I_{yy}$ | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913       | 0.6189 |
| $v^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $v^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |

### 4.2.2.2 Referencial principal

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_1$    | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913       | 0.6189 |
| $I_2$    | m <sup>4</sup> | 0.5968 | 0.5913       | 0.6189 |
| $v^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $v^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^+$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $w^-$    | m              | 1.0000 | 1.0000       | 1.0000 |
| $\alpha$ | °              | 0.00   | 0.00         | 0.00   |

## Torção e cisalhamento (MEF)

Pela simetria de revolução, o centro de cisalhamento coincide com o centro de gravidade ( $y_T = z_T = y_G = z_G = 1.0$  m) e o empenamento é nulo ( $\Gamma = 0$ ). A relação  $A_{sz}/A = 0.84/1.60 \approx 0.53$ : a seção vazada é menos eficiente em cisalhamento do que uma seção maciça.

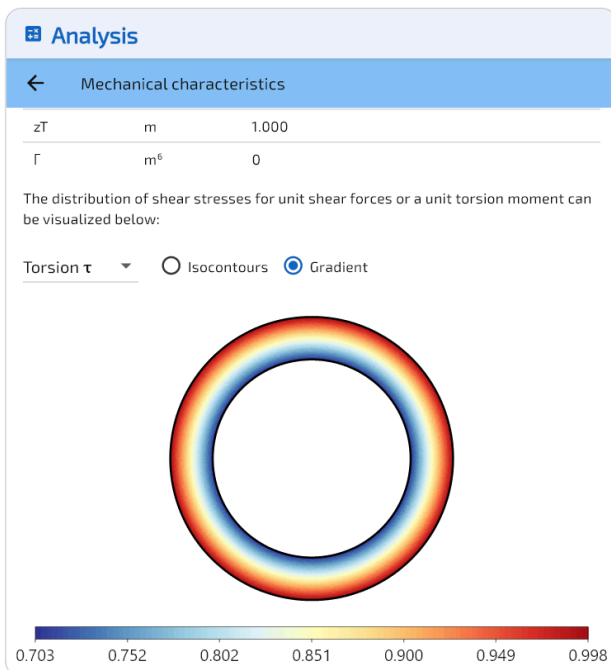


Figura 7: Tensões de torção  $\tau$  — máximo no contorno externo.

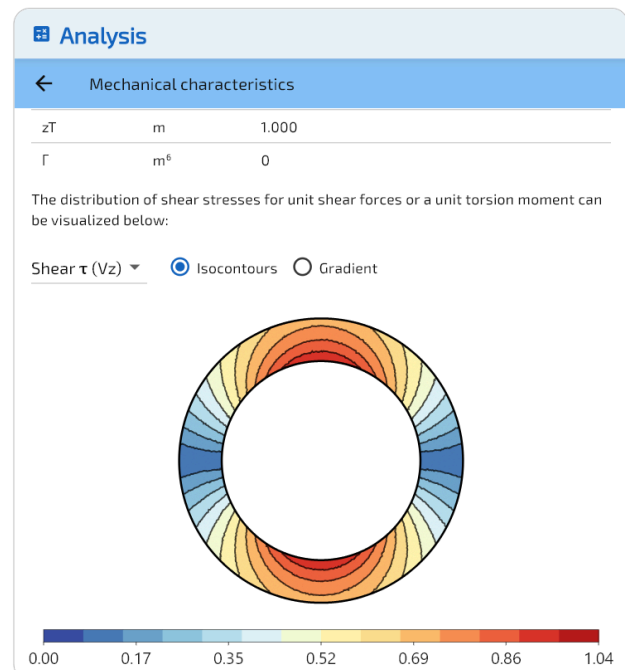


Figura 8: Tensões de cisalhamento.

|         | $J$            | $A_{sz}$       | $A_{sy}$       | $y_T$  | $z_T$  | $\Gamma$       |
|---------|----------------|----------------|----------------|--------|--------|----------------|
| Unidade | m <sup>4</sup> | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | m      | m      | m <sup>6</sup> |
| Valor   | 1.1936         | 0.8422         | 0.8422         | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000         |

# Parede em L

## Dados

### Concreto

Tipo L — largura 2.0 m, altura 2.0 m

Espessura  $t = 0.3$  m

Massa específica  $\rho = 2.5$  t/m<sup>3</sup>

### Armaduras

HA20 espaçamento 200 mm, cobrimento 40 mm

1 camada — coeficiente de equivalência  $n = 5$

## Entrada de dados e resultados

Figura 9: Entrada de dados da parede em L.

**General results**

The area  $A$ , perimeter  $P$ , weight per linear meter  $W$  and the coordinates of the center of gravity ( $z_G$ ,  $y_G$ ) are given below:

| Cara  | Unit           | Raw    | Net    | Homog. |
|-------|----------------|--------|--------|--------|
| $A$   | m <sup>2</sup> | 1.1100 | 1.0974 | 1.1603 |
| $z_G$ | m              | 0.609  | 0.609  | 0.610  |
| $y_G$ | m              | 0.609  | 0.609  | 0.610  |
| $P$   | m              | 8.000  | -      | -      |
| $W$   | T/m            | 2.775  | -      | -      |

*$z_G$  and  $y_G$  are given respectively with respect to the extreme fiber on the left and at the bottom of the section.*

**Centroidal reference frame**

The central reference frame is positioned at the center of gravity of the gross section. The  $z$ -axis is horizontal, oriented to the right and the  $y$ -axis is vertical, oriented upwards.

Figura 10: Página de resultados das propriedades mecânicas.

Como as abas têm o mesmo comprimento,  $I_{zz} = I_{yy}$  e o ângulo principal é exatamente  $\alpha = 45^\circ$ .

## Resultados gerais

|       | Unidade        | Bruta  | Líquida | Hom.   |
|-------|----------------|--------|---------|--------|
| $A$   | m <sup>2</sup> | 1.1100 | 1.0974  | 1.1603 |
| $z_G$ | m              | 0.6095 | 0.6093  | 0.6100 |
| $y_G$ | m              | 0.6095 | 0.6093  | 0.6100 |
| $P$   | m              | 8.0000 | —       | —      |
| $W$   | T/m            | 2.7750 | —       | —      |

## Flexão

### 5.2.2.1 Referencial central

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_{zz}$ | m <sup>4</sup> | 0.4030 | 0.3981       | 0.4225 |
| $I_{yy}$ | m <sup>4</sup> | 0.4030 | 0.3981       | 0.4225 |
| $v^+$    | m              | 1.3905 | 1.3907       | 1.3900 |
| $v^-$    | m              | 0.6095 | 0.6093       | 0.6100 |
| $w^+$    | m              | 1.3905 | 1.3907       | 1.3900 |
| $w^-$    | m              | 0.6095 | 0.6093       | 0.6100 |

### 5.2.2.2 Referencial principal

|          | Uni-<br>dade   | Bruta  | Lí-<br>quida | Hom.   |
|----------|----------------|--------|--------------|--------|
| $I_1$    | m <sup>4</sup> | 0.6373 | 0.6297       | 0.6679 |
| $I_2$    | m <sup>4</sup> | 0.1687 | 0.1666       | 0.1771 |
| $v^+$    | m              | 1.4142 | 1.4142       | 1.4142 |
| $v^-$    | m              | 1.4142 | 1.4142       | 1.4142 |
| $w^+$    | m              | 0.7644 | 0.7644       | 0.7644 |
| $w^-$    | m              | 0.8619 | 0.8619       | 0.8619 |
| $\alpha$ | °              | 45.00  | 45.00        | 45.00  |

## Torção e cisalhamento (MEF)

O centro de cisalhamento ( $y_T = z_T = 0.16$  m) está deslocado em direção ao canto reentrante, longe do centro de gravidade ( $y_G = z_G = 0.61$  m). O empenamento é significativo ( $\Gamma = 0.009$  m<sup>6</sup>). A constante de torção  $J = 0.032$  m<sup>4</sup> é muito baixa — típica de um perfil aberto de parede fina. A relação  $A_{sz}/A = 0.50/1.11 \approx 0.45$ .

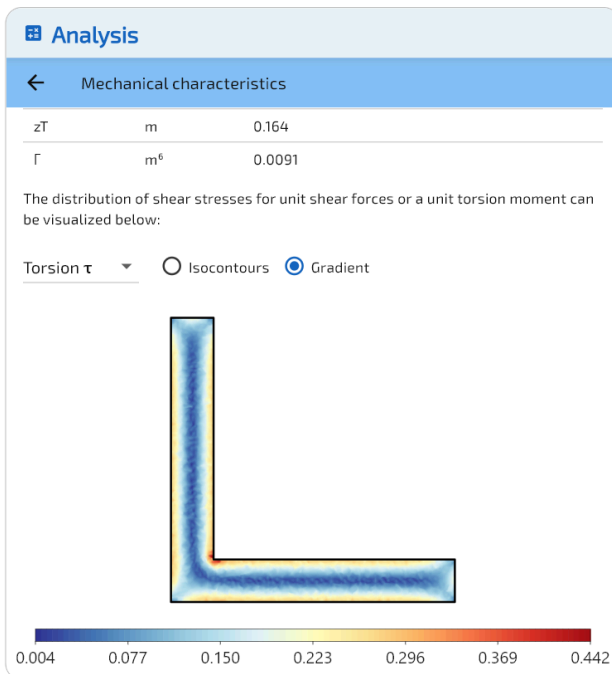


Figura 11: Tensões de torção  $\tau$  — singularidade no canto reentrante. Centro de cisalhamento deslocado.

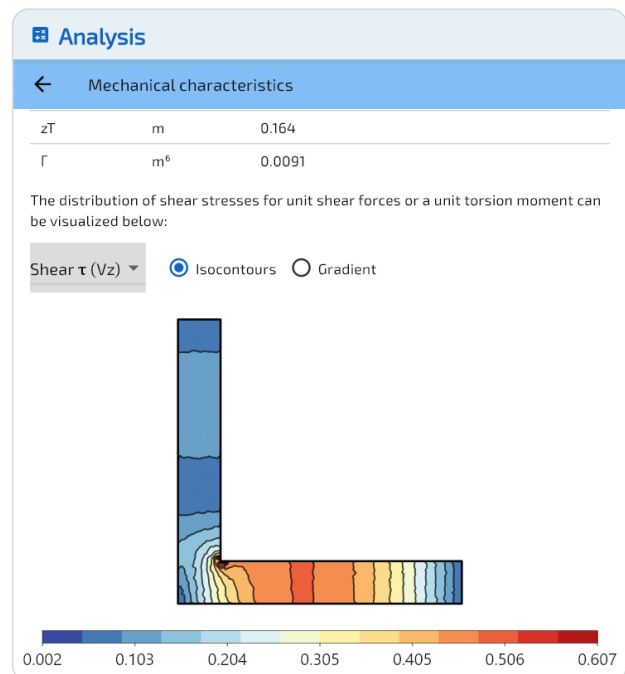


Figura 12: Tensões de cisalhamento.

|         | $J$            | $A_{sz}$       | $A_{sy}$       | $y_T$ | $z_T$ | $\Gamma$       |
|---------|----------------|----------------|----------------|-------|-------|----------------|
| Unidade | m <sup>4</sup> | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | m     | m     | m <sup>6</sup> |

|       | $J$    | $A_{sz}$ | $A_{sy}$ | $y_T$  | $z_T$  | $\Gamma$ |
|-------|--------|----------|----------|--------|--------|----------|
| Valor | 0.0322 | 0.5037   | 0.5037   | 0.1637 | 0.1637 | 0.0091   |

# Validação dos resultados

Os resultados do SectionPro são validados de duas formas: por comparação com **fórmulas analíticas** (quando existem) e por **comparação cruzada** com um software de referência que utiliza um solver de elementos finitos independente.

## Resumo das fórmulas analíticas

Seção quadrada ( $a = 2.0$  m)

$$A = a^2 = 4.0000 \quad I = \frac{a^4}{12} = 1.3333 \quad J = 0.1406a^4 = 2.2489 \quad A_s = \frac{5}{6}A = 3.3333$$

A constante de torção é obtida pelas séries de Saint-Venant:

$$J = \frac{a^4}{3} \left[ 1 - \frac{192}{\pi^5} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh(n\pi/2)}{n^5} \right]$$

Seção circular vazada ( $R = 1.0$  m,  $r = 0.7$  m)

$$A = \pi(R^2 - r^2) = 1.6022 \quad I = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4) = 0.5968 \quad J = \frac{\pi}{2}(R^4 - r^4) = 1.1936$$

As áreas de cisalhamento não possuem fórmula simples; a equação diferencial deve ser resolvida numericamente.

Parede em L ( $L = 2.0$  m,  $t = 0.3$  m)

Por decomposição (mesa  $2.0 \times 0.3$  + alma  $0.3 \times 1.7$ ) e teorema de Steiner:

$$A = 1.1100 \quad z_G = y_G = 0.6095 \quad I_{zz} = I_{yy} = 0.4030 \quad \alpha = 45^\circ$$

Não existe fórmula analítica exata para a torção, o cisalhamento e o empenamento. A teoria de Vlasov (perfis abertos de parede fina) fornece, no entanto, uma ordem de grandeza:  $J \approx \frac{1}{3}(2L - t)t^3 = 0.0333$  m<sup>4</sup> e o centro de cisalhamento situa-se aproximadamente na interseção das linhas médias das abas ( $y_T \approx z_T \approx t/2 = 0.15$  m). Essas estimativas supõem uma espessura infinitamente pequena em relação ao comprimento das abas; aqui  $t/L = 15\%$ , e os efeitos de espessura — notadamente o enrijecimento da junção no canto — deslocam os valores reais em relação a esse modelo simplificado.

## Seções líquida e homogeneizada

Para uma seção armada com  $N$  barras de aço de seção  $A_{s,i}$  nas coordenadas  $(z_{s,i}, y_{s,i})$ , com um coeficiente de equivalência  $n$ :

$$A_{\text{net}} = A - \sum_{i=1}^N A_{s,i} \quad A_{\text{hom}} = A + (n-1) \sum_{i=1}^N A_{s,i}$$

O centro de gravidade se desloca ligeiramente (fórmula análoga para  $z_G$ ):

$$y_{G,\text{net}} = \frac{A \cdot y_G - \sum_i A_{s,i} y_{s,i}}{A_{\text{net}}} \quad y_{G,\text{hom}} = \frac{A \cdot y_G + (n-1) \sum_i A_{s,i} y_{s,i}}{A_{\text{hom}}}$$

A inércia é deduzida pelo teorema de Steiner, levando em conta o deslocamento  $\Delta y_G$  entre o centro de gravidade da seção considerada e o da seção bruta:

$$I_{zz,\text{net}} = I_{zz} + A(\Delta y_G)^2 - \sum_i A_{s,i} (y_{s,i} - y_{G,\text{net}})^2$$

$$I_{zz,\text{hom}} = I_{zz} + A(\Delta y_G)^2 + (n-1) \sum_i A_{s,i} (y_{s,i} - y_{G,\text{hom}})^2$$

## Validação — Propriedades de flexão

As fórmulas analíticas acima foram aplicadas às três seções utilizando as coordenadas exatas das armaduras exportadas pelo SectionPro. Todos os resultados coincidem.

| Seção        | Propriedade                        | Bruta  | $\Delta$ | Líquida | $\Delta$ | Hom.   | $\Delta$ |
|--------------|------------------------------------|--------|----------|---------|----------|--------|----------|
| Quadrada     | $A$ (m <sup>2</sup> )              | 4.0000 | 0.00 %   | 3.9823  | 0.00 %   | 4.0707 | 0.00 %   |
|              | $z_G, y_G$ (m)                     | 1.0000 | 0.00 %   | 1.0000  | 0.00 %   | 1.0000 | 0.00 %   |
|              | $I_{zz}, I_{yy}$ (m <sup>4</sup> ) | 1.3333 | 0.00 %   | 1.3226  | 0.00 %   | 1.3761 | 0.00 %   |
| Circ. vazada | $A$ (m <sup>2</sup> )              | 1.6022 | 0.00 %   | 1.5871  | 0.00 %   | 1.6625 | 0.00 %   |
|              | $z_G, y_G$ (m)                     | 1.0000 | 0.00 %   | 1.0000  | 0.00 %   | 1.0000 | 0.00 %   |
|              | $I_{zz}, I_{yy}$ (m <sup>4</sup> ) | 0.5968 | 0.00 %   | 0.5913  | 0.00 %   | 0.6189 | 0.00 %   |
| Parede em L  | $A$ (m <sup>2</sup> )              | 1.1100 | 0.00 %   | 1.0974  | 0.00 %   | 1.1603 | 0.00 %   |
|              | $z_G, y_G$ (m)                     | 0.6095 | 0.00 %   | 0.6093  | 0.00 %   | 0.6100 | 0.00 %   |
|              | $I_{zz}, I_{yy}$ (m <sup>4</sup> ) | 0.4030 | 0.00 %   | 0.3981  | 0.00 %   | 0.4225 | 0.00 %   |

## Validação — Torção e cisalhamento (comparação cruzada)

As propriedades de torção e cisalhamento, calculadas por elementos finitos, são comparadas com um software de referência que utiliza um solver independente.

| Seção        | Propriedade                        | Analítico | SectionPro | $\Delta$ | Ref.   | $\Delta$ |
|--------------|------------------------------------|-----------|------------|----------|--------|----------|
| Quadrada     | $J$ (m <sup>4</sup> )              | 2.2489    | 2.2492     | 0.01 %   | 2.2585 | 0.41 %   |
|              | $A_{sz}, A_{sy}$ (m <sup>2</sup> ) | 3.3333    | 3.3333     | 0.00 %   | 3.3355 | 0.07 %   |
|              | $y_T, z_T$ (m)                     | 1.0000    | 1.0000     | 0.00 %   | 1.0000 | 0.00 %   |
| Circ. vazada | $J$ (m <sup>4</sup> )              | 1.1936    | 1.1936     | 0.00 %   | 1.1920 | 0.13 %   |
|              | $A_{sz}, A_{sy}$ (m <sup>2</sup> ) | —         | 0.8422     | —        | 0.8418 | —        |
|              | $y_T, z_T$ (m)                     | 1.0000    | 1.0000     | 0.00 %   | 1.0000 | 0.00 %   |
| Parede em L  | $J$ (m <sup>4</sup> )              | —         | 0.0322     | —        | 0.0328 | —        |
|              | $A_{sz}$ (m <sup>2</sup> )         | —         | 0.5037     | —        | 0.5054 | —        |
|              | $A_{sy}$ (m <sup>2</sup> )         | —         | 0.5037     | —        | 0.5024 | —        |
|              | $y_T, z_T$ (m)                     | —         | 0.1637     | —        | 0.1639 | —        |

**Parede em L** — A teoria de Vlasov ( $J \approx 0.033$  m<sup>4</sup>,  $y_T \approx 0.15$  m) fornece uma ordem de grandeza comparável, mas permanece uma aproximação pois considera segmentos sem espessura (enquanto  $t/L = 15\%$ ).

## Conclusão

| Seção        | Validação  | Desvio flexão | Desvio torção (ref.) |
|--------------|--|---------------|----------------------|
| Quadrada     | Analítico  | 0.00 %        | 0.41 %               |
| Circ. vazada | Analítico + referência ( $A_{sy}, A_{sz}$ )              | 0.00 %        | 0.13 %               |
| Parede em L  | Analítico + referência ( $J, A_{sy}, A_{sz}, y_T, z_T$ ) | 0.00 %        | 1.86 %               |

As propriedades de flexão (área, centro de gravidade, momentos de inércia) são reproduzidas com precisão perfeita nas três geometrias, em seção bruta, líquida e homogeneizada (desvio de 0.00 % em relação às fórmulas analíticas).

As propriedades de torção e cisalhamento, calculadas por elementos finitos, dependem da fineza da malha. A comparação cruzada com um software de referência mostra uma concordância muito boa entre os dois solvers. O SectionPro apresenta, no entanto, uma melhor convergência, como evidenciado por sua correspondência exata com as soluções analíticas de torção e cisalhamento quando estas existem.