



# Abertura de Fendas

Tutorial SectionPro — Abertura de fendas  $w_k$  e espaçamento máximo  $s_{r, \max}$  no estado limite de serviço segundo o Eurocódigo 2

BridgeKernel · 2026

## Introdução

O betão armado fendilha sob cargas de serviço. As fendas não comprometem a segurança, mas aberturas excessivas expõem as armaduras à água, cloretos e  $\text{CO}_2$ , provocando corrosão. Os regulamentos limitam assim  $w_k$  no ELS.

O SectionPro aplica o cálculo directo do Eurocódigo 2. A abertura de fendas é o produto do espaçamento máximo e da extensão diferencial média aço–betão:

$$w_k = s_{r, \max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

O espaçamento depende do recobrimento  $c$ , do diâmetro  $\varphi_s$ , do factor de aderência  $k_1$  e da taxa de armadura efectiva  $\rho_{p, \text{eff}}$ :

$$s_{r, \max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\varphi_s}{\rho_{p, \text{eff}}}$$

A extensão diferencial média inclui o tension stiffening (o betão entre fendas absorve parte da tracção):

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct, \text{eff}}}{\rho_{p, \text{eff}}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p, \text{eff}})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

A altura efectiva da zona traccionada  $h_{c, \text{eff}}$  é calculada automaticamente:  $h_{c, \text{eff}} = \min(2.5(h - d), (h - x)/3, h/2)$ .

## Resultados calculados

O SectionPro fornece para cada análise de fendilhação:

### Resultados por caso

$w_k$ : abertura de fendas  
 $s_{r, \max}$ : espaçamento máx.  
 $\sigma_s$ : tensão no aço

### Valores intermédios

$h_{c, \text{eff}}$ ,  $A_{c, \text{eff}}$ ,  $A_{s, \text{eff}}$ ,  $\rho_{p, \text{eff}}$   
 $k_2$ ,  $\varphi_s$ ,  $\Delta\varepsilon$   
 $d$ ,  $x$ ,  $c$

### Exportações

PDF, Excel (.xlsx), Texto  
Combinações desfavoráveis, valores intermédios

# Laje rectangular

## Dados de entrada

### Betão

- Secção transversal rectangular
- Largura  $b = 1.00$  m
- Altura  $h = 0.30$  m

### Armaduras

- 14 varões  $\varnothing 14$  ( $\varphi_s = 14$  mm)
- 7 inferior + 7 superior, espaçamento 157 mm
- Recobrimento 30 mm, 1 camada por face
- $A_s = 14 \times 1.539 = 21.55$  cm<sup>2</sup>

### Leis dos materiais (EC2)

- Betão C30/37:  $f_{ck} = 30$  MPa
- Aço B500B:  $f_{yk} = 500$  MPa

**Data**

← Solid Rectangular Section

**Concrete**

Width (m) 1 Height (m) 0.3

**Reinforcement**

Mode: count on each side

Define one or multiple layers of reinforcement:

Layer position: Top

Number of rebars 7 Bar diameter (mm) 14.0 Concrete cover (mm) 30.0 Layers (1 or 2) 1

Submit Infos

Figura 1: Laje rectangular.

## Resultados

A abertura de fendas é avaliada para dois estados de carga: flexão simples e tracção dominante. Os parâmetros de fendilhação mantêm os valores recomendados:  $k_t = 0.6$  (longo prazo),  $k_1 = 0.8$  (varões de alta aderência),  $k_3 = 3.4$ ,  $k_4 = 0.425$ ,  $f_{ct,eff} = 3.2$  MPa.

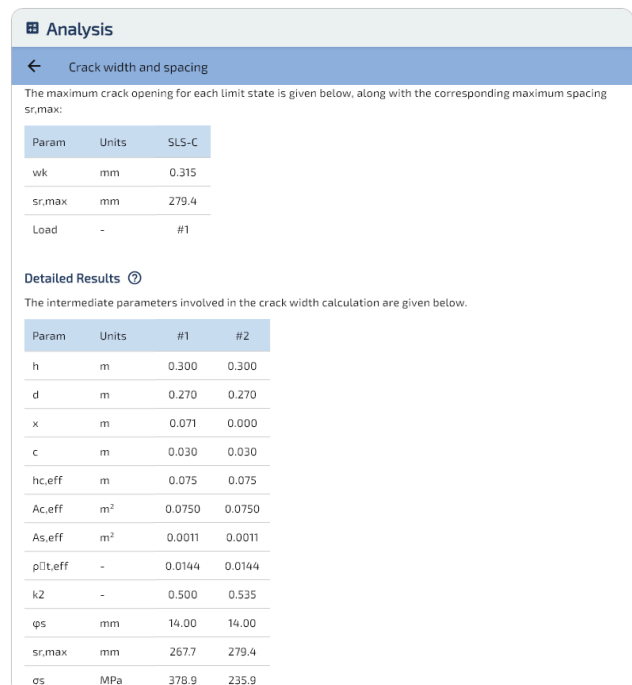
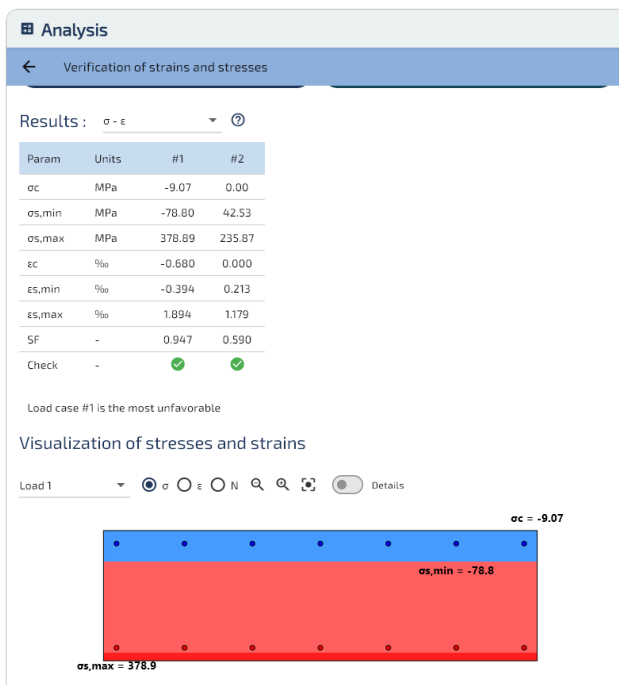


Figura 2: Laje: estado de tensão-extensão (esq.) e tabela de fendilhação (dir.).

Em flexão simples ( $M_z = 100$  kN·m), o eixo neutro situa-se a  $x = 71$  mm, deixando  $h - x = 229$  mm da secção em tracção. Com  $k_2 = 0.5$ , a fórmula do espaçamento dá  $s_{r,max} = 267.7$  mm. A abertura  $w_k = 0.315$  mm excede o limite habitual de 0.3 mm: na prática, seria necessário aumentar a espessura da laje ou reduzir o espaçamento dos varões.

Em tracção ( $N = -300 \text{ kN}$ ,  $M_z = 25 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ), toda a secção está fendilhada ( $x = 0$ ). Apesar da fendilhação total,  $w_k = 0.198 \text{ mm}$  é inferior ao caso de flexão, porque os 14 varões partilham o esforço, reduzindo  $\sigma_s$  de 379 para 236 MPa. O factor  $k_2 = 0.535$  reflecte a distribuição de extensões ligeiramente não uniforme devida ao momento flector residual.

## Viga em I: flexão simples

### Dados de entrada

#### Betão

- Secção transversal em I com esquadros
- Banzo inferior:  $b = 0.75 \text{ m}$
- Alma:  $b_w = 0.25 \text{ m}$
- Banzo superior:  $b_f = 1.60 \text{ m}$
- Altura total  $h = 1.80 \text{ m}$

#### Armaduras (aço passivo)

- 70 varões no total (HA16 + HA20)
- 6 HA20 como armadura inferior
- 64 HA16 distribuídos ao longo do contorno

#### Leis dos materiais (EC2)

- Betão C30/37:  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Aço B500B:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

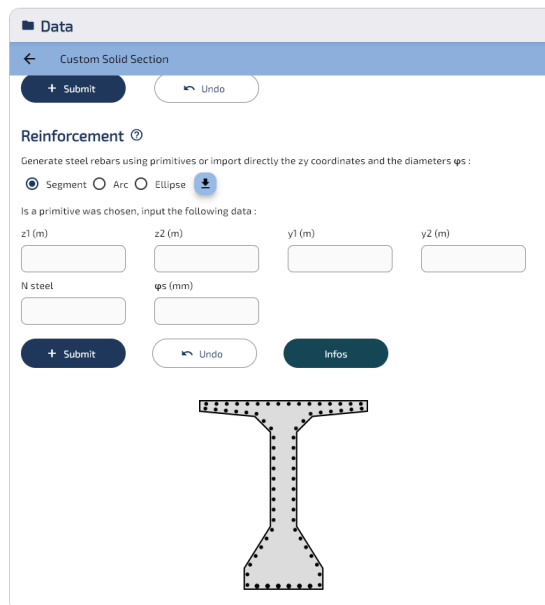


Figura 3: Viga em I.

### Resultados

A viga em I é solicitada em flexão simples a três níveis crescentes de momento ( $M_z = 1000, 2000$  e  $2500 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ). Parâmetros de fendilhação:  $k_t = 0.6$ ,  $k_1 = 0.8$ ,  $k_3 = 3.4$ ,  $k_4 = 0.425$ ,  $f_{ct,eff} = 2.9 \text{ MPa}$ .

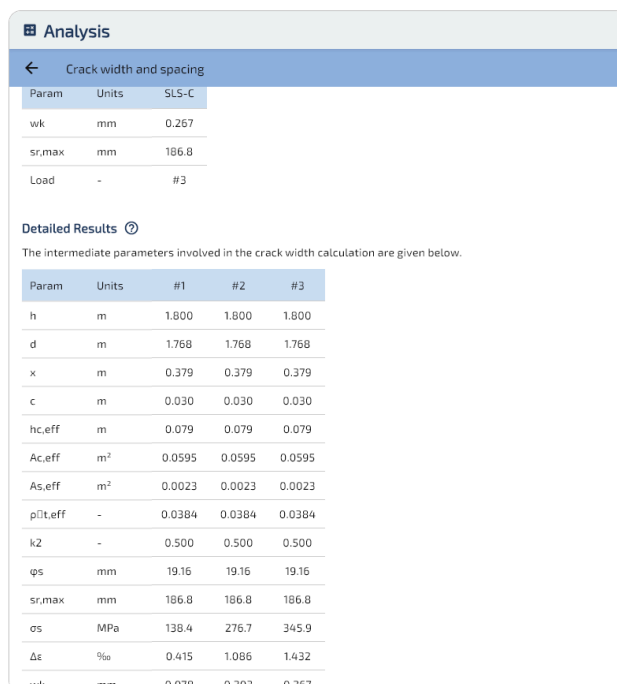
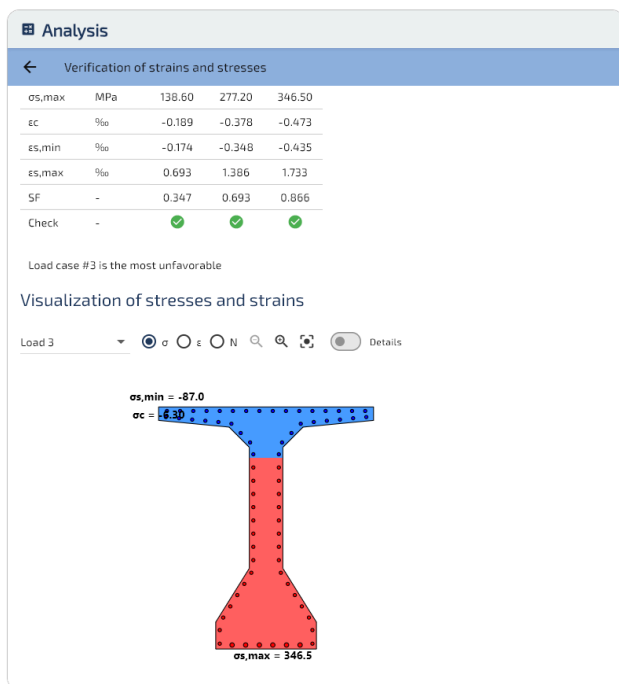


Figura 4: Viga em I: estado de tensão-extensão (esq.) e tabela de fendilhação (dir.).

A abertura de fendas aumenta com o momento aplicado:  $w_k = 0.078$  mm para  $M_z = 1000$  kN · m, 0.203 mm para 2000 kN · m e 0.267 mm para 2500 kN · m, todos abaixo do limite de 0.3 mm. O espaçamento  $s_{r, \max} = 186.8$  mm permanece constante em todos os níveis de carga, pois depende apenas da geometria e da disposição das armaduras.

## Desempenho

O cálculo da abertura de fendas é instantâneo: menos de 10 ms para projectos correntes (até 1 000 casos de carga SLS) e menos de meio segundo mesmo para 100 000 casos.

## Exportação

O SectionPro exporta a análise de fendilhação em três formatos: **PDF**, **texto** (colunas de largura fixa) e **Excel** (.xlsx). Os dados exportados incluem todos os resultados por caso de carga ( $w_k$ ,  $s_{r, \max}$ ,  $\sigma_s$ ,  $h_{c, \text{eff}}$ ,  $\rho_{p, \text{eff}}$ , etc.) ordenados por  $w_k$  decrescente.

Crack width and spacing				
GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE ON : 2026-05-21 17:33				
Main results				
Param	Units	SLS-C		
wk	mm	0.267		
sr,max	mm	186.8		
Load	-	#3		

Below are the crack openings wk and their maximum spacing sr,max for the most unfavorable loads of each limit state. The obtained values can then be compared with the limits prescribed by the normative context.

Detailed Results				
Below are the intermediate parameters involved in the EN-1992 calculation methodology:				
Param	Units	#3	#2	#1
h	m	1.800	1.800	1.800
d	m	1.768	1.768	1.768
x	m	0.379	0.379	0.379
c	m	0.030	0.030	0.030
hc,eff	m	0.079	0.079	0.079
Ac,eff	m <sup>2</sup>	0.0595	0.0595	0.0595
As,eff	m <sup>2</sup>	0.0023	0.0023	0.0023
pt,eff	-	0.0384	0.0384	0.0384
k2	-	0.500	0.500	0.500
φs	mm	19.16	19.16	19.16
sr,max	mm	186.8	186.8	186.8
σs	MPa	345.9	276.7	138.4
Δε	‰	1.432	1.086	0.415
wk	mm	0.267	0.203	0.078

GENERATED BY THE SECTIONPRO SOFTWARE

Figura 5: Exportação PDF: resultados de fendilhação.

## Conclusão

O cálculo directo da abertura de fendas segundo o EC2 §7.3.4 proporciona uma avaliação rigorosa do estado de fendilhação no estado limite de serviço. O SectionPro automatiza todo o procedimento:

desde a análise de tensões–extensões até à determinação da zona de tracção efectiva  $h_{c,eff}$ , do espaçamento de fendas  $s_{r,max}$  e da abertura final  $w_k$ .

Os dois exemplos ilustram cenários contrastantes: uma laje rectangular sob flexão e tracção, e uma viga em I sob momentos flectores crescentes.

O cálculo aplica-se a secções de forma arbitrária: a zona de tracção efectiva e a detecção de armaduras são calculadas a partir da geometria geral da secção, sem se limitar a hipóteses rectangulares. O método é igualmente aplicável a outros contextos regulamentares, adaptando os parâmetros de fendilhação ( $k_t, k_1, k_3, k_4, f_{ct,eff}$ ) aos valores prescritos pelo regulamento em vigor.