



Analisi della fessurazione

Tutorial SectionPro — Apertura di fessura w_k e distanza massima tra le fessure $s_{r, \max}$ allo stato limite di esercizio secondo l'Eurocodice 2

BridgeKernel · 2026

Introduzione

Il calcestruzzo armato fessura sotto carichi di esercizio. Le fessure non compromettono la sicurezza, ma aperture eccessive espongono l'armatura ad acqua, cloruri e CO_2 , causando corrosione. Le normative limitano pertanto w_k allo SLE.

SectionPro applica il calcolo diretto dell'Eurocodice 2. L'apertura di fessura e il prodotto della distanza massima tra fessure e della deformazione differenziale media acciaio-calcestruzzo:

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

La distanza tra fessure dipende dal copriferro c , dal diametro φ_s , dal fattore di aderenza k_1 e dal rapporto di armatura efficace $\rho_{p, \text{eff}}$:

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

La deformazione differenziale media include il tension stiffening (il calcestruzzo tra fessure sopporta parte della trazione):

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

L'altezza dell'area efficace $h_{c, \text{eff}}$ e calcolata automaticamente: $h_{c, \text{eff}} = \min(2.5(h - d), (h - x)/3, h/2)$.

Risultati calcolati

SectionPro fornisce per ogni analisi della fessurazione:

Risultati per caso

w_k : apertura di fessura
 $s_{r, \max}$: distanza max
 σ_s : tensione acciaio

Valori intermedi

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

Export

PDF, Excel (.xlsx), Testo
Combinazioni sfavorevoli, valori intermedi

Soletta rettangolare

Dati di input

Calcestruzzo

- Sezione trasversale rettangolare
- Larghezza $b = 1.00$ m
- Altezza $h = 0.30$ m

Armatura

- 14 barre $\varnothing 14$ ($\varphi_s = 14$ mm)
- 7 inferiori + 7 superiori, passo 157 mm
- Copriferro 30 mm, 1 strato per faccia
- $A_s = 14 \times 1.539 = 21.55$ cm²

Leggi costitutive (EC2)

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

Figura 1: Soletta rettangolare.

Risultati

L'apertura di fessura è valutata per due stati di carico: flessione pura e trazione dominante. I parametri di fessurazione sono ai valori raccomandati: $k_t = 0.6$ (lungo termine), $k_1 = 0.8$ (barre ad aderenza migliorata), $k_3 = 3.4$, $k_4 = 0.425$, $f_{ct,eff} = 3.2$ MPa.

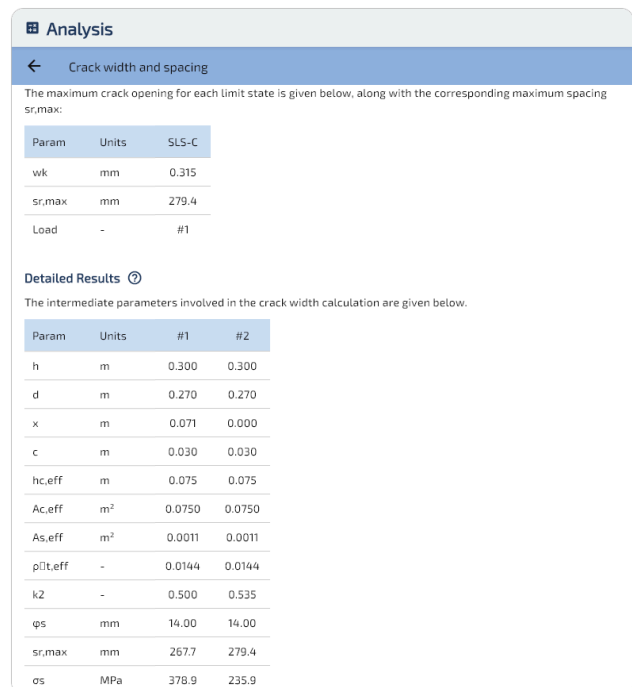
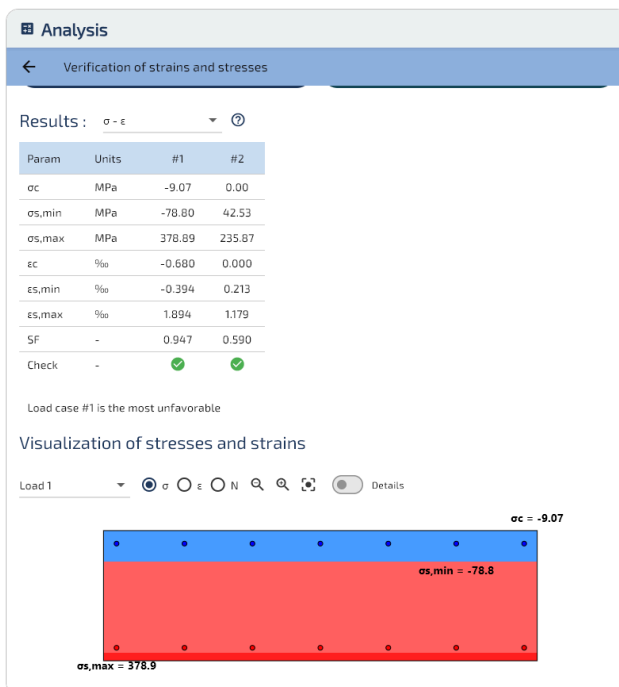


Figura 2: Soletta: stato tensione-deformazione (sinistra) e tabella risultati fessurazione (destra).

In flessione pura ($M_z = 100$ kN · m), l'asse neutro si trova a $x = 71$ mm, lasciando $h - x = 229$ mm della sezione in trazione. Con $k_2 = 0.5$, la formula fornisce $s_{r,max} = 267.7$ mm. L'apertura $w_k = 0.315$ mm supera il limite usuale di 0.3 mm: in pratica occorrerebbe una soletta più spessa o un passo delle barre più ridotto.

In trazione ($N = -300 \text{ kN}$, $M_z = 25 \text{ kN} \cdot \text{m}$), l'intera sezione è fessurata ($x = 0$). Nonostante la fessurazione completa, $w_k = 0.198 \text{ mm}$ e inferiore rispetto alla flessione perché tutte le 14 barre ripartiscono il carico, riducendo σ_s da 379 a 236 MPa. Il fattore $k_2 = 0.535$ riflette la distribuzione delle deformazioni leggermente non uniforme causata dal momento flettente residuo.

Trave a I: flessione pura

Dati di input

Calcestruzzo

- Sezione trasversale a I con gusci
- Ala inferiore: $b = 0.75 \text{ m}$
- Anima: $b_w = 0.25 \text{ m}$
- Ala superiore: $b_f = 1.60 \text{ m}$
- Altezza totale $h = 1.80 \text{ m}$

Armatura (solo acciaio passivo)

- 70 barre totali (HA16 + HA20)
- 6 HA20 come armatura inferiore
- 64 HA16 distribuite lungo il contorno della sezione

Leggi costitutive (EC2)

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

Risultati

La trave a I è sollecitata a flessione pura con tre livelli crescenti di momento ($M_z = 1000, 2000$ e $2500 \text{ kN} \cdot \text{m}$). Parametri di fessurazione: $k_t = 0.6$, $k_1 = 0.8$, $k_3 = 3.4$, $k_4 = 0.425$, $f_{ct,eff} = 2.9 \text{ MPa}$.

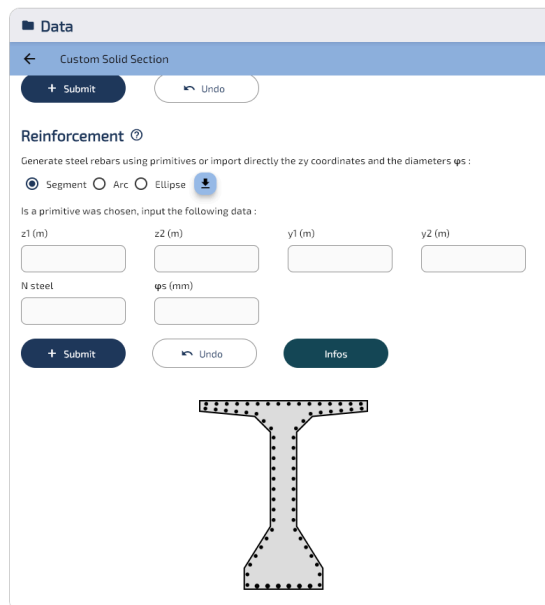


Figura 3: Trave a I.

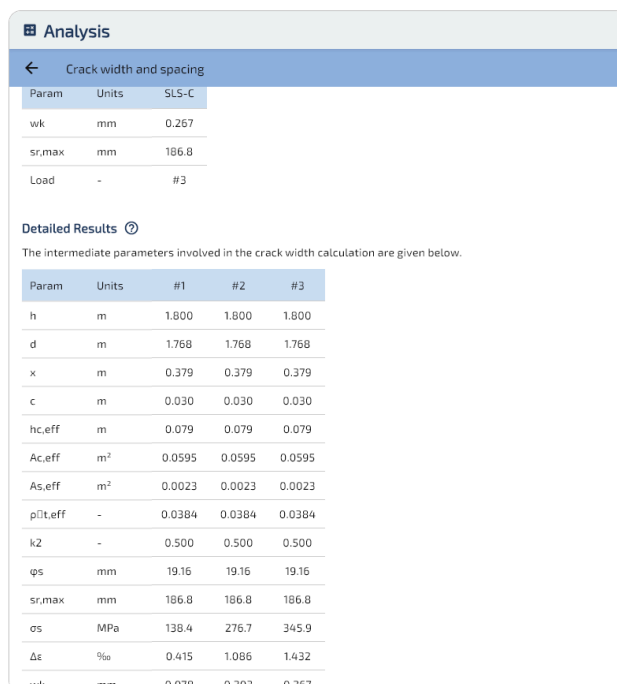
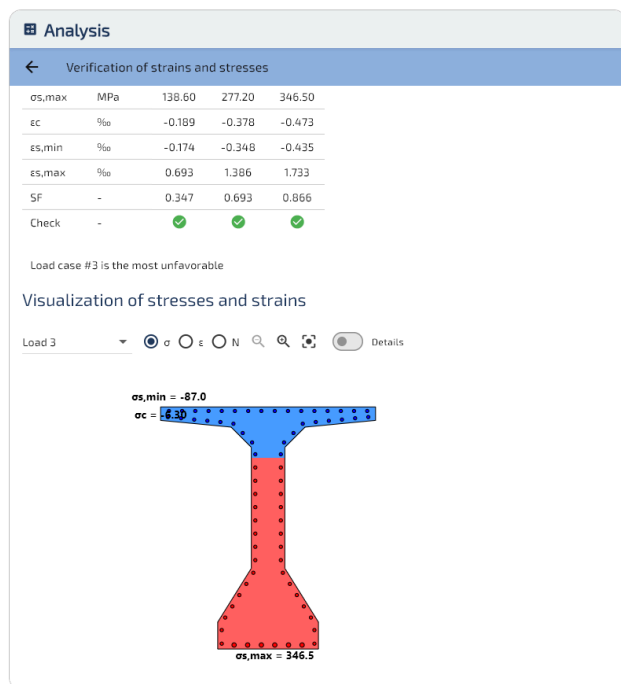


Figura 4: Trave a I: stato tensione-deformazione (sinistra) e tabella risultati fessurazione (destra).

L'apertura di fessura cresce con il momento applicato: $w_k = 0.078$ mm per $M_z = 1000$ kN · m, 0.203 mm per 2000 kN · m e 0.267 mm per 2500 kN · m, tutti al di sotto del limite di 0.3 mm. La distanza $s_{r,max} = 186.8$ mm resta costante per tutti i livelli di carico poiché dipende unicamente dalla geometria e dalla disposizione dell'armatura.

Benchmark

Il calcolo della fessurazione è istantaneo: meno di 10 ms per progetti tipici (fino a 1 000 casi di carico SLE) e meno di mezzo secondo anche per 100 000 casi.

Esportazione

SectionPro esporta l'analisi della fessurazione in tre formati: **PDF**, **testo** (colonne a larghezza fissa) ed **Excel** (.xlsx). I dati esportati includono tutti i risultati per caso di carico (w_k , $s_{r,max}$, σ_s , $h_{c,eff}$, $\rho_{p,eff}$, ecc.) ordinati per 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 ²	0.0595	0.0595	0.0595
As,eff	m ²	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: Esportazione PDF: risultati della fessurazione.

Conclusione

Il calcolo diretto dell'apertura di fessura secondo l'EC2 §7.3.4 fornisce una valutazione rigorosa dello stato di fessurazione allo stato limite di esercizio. SectionPro automatizza l'intera procedura:

dall'analisi tensione–deformazione alla determinazione dell'area efficace in trazione $h_{c,eff}$, della distanza tra le fessure $s_{r,max}$ e dell'apertura finale w_k .

I due esempi illustrano scenari contrastanti: una soletta rettangolare sottoposta a flessione e trazione, e una trave a I sotto momenti flettenti crescenti.

Il calcolo si applica a sezioni trasversali di forma arbitraria: l'area efficace in trazione e il rilevamento dell'armatura sono calcolati dalla geometria generale della sezione, senza limitarsi a ipotesi rettangolari. Il metodo è applicabile anche ad altri contesti normativi adattando i parametri di fessurazione ($k_t, k_1, k_3, k_4, f_{ct,eff}$) ai valori prescritti dalla norma di riferimento.