

# Verifica agli Stati Limite di Esercizio

## Strutture in Cemento Armato

Edizione 3 – Aggiornamento D.M. 17/01/2018  
Circolare 21/01/2019 N.7 CSLLPP

### 1. **Stati Limite di Esercizio (§ 4.1.2.2)**

Si deve verificare il rispetto dei seguenti stati limite :

- deformazione;
- vibrazione;
- fessurazione;
- tensioni di esercizio;
- fatica per quanto riguarda eventuali danni che possano compromettere la durabilità, per la quale sono definite regole specifiche nei punti seguenti.

#### 1.1. **Stato Limite di deformazione (§ 4.1.2.2.2)**

I limiti di deformabilità devono essere congruenti con le prestazioni richieste alla struttura anche in relazione alla destinazione d'uso, con riferimento alle esigenze statiche, funzionali ed estetiche.

I valori limite devono essere commisurati a specifiche esigenze e possono essere dedotti da documentazione tecnica di comprovata validità.

#### 1.2. **Stato Limite per vibrazioni (§ 4.1.2.2.3)**

Quando richiesto, devono essere individuati limiti per vibrazioni:

- al fine di assicurare accettabili livelli di benessere (dal punto di vista delle sensazioni percepite dagli utenti),
- al fine di prevenire possibili danni negli elementi secondari e nei componenti non strutturali,
- al fine di evitare possibili danni che compromettano il funzionamento di macchine e apparecchiature.

### 2. **Stato Limite di Fessurazione (§ 4.1.2.2.4)**

In ordine di severità decrescente, per la combinazione di azioni prescelta, si distinguono i seguenti stati limite:

- stato limite di decompressione, nel quale la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0;
- stato limite di formazione delle fessure, nel quale la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = f_{ctm}/1,2 \quad (4.1.13)$$

dove  $f_{ctm}$  è definito nel § 11.2.10.2;

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{per classi} \leq C50/60 \quad [11.2.3a]$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln [1+f_{cm}/10] \quad \text{per classi} > C50/60 \quad [11.2.3b]$$

c) stato limite di apertura delle fessure, nel quale il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$$w_1 = 0,2 \text{ mm} \qquad w_2 = 0,3 \text{ mm} \qquad w_3 = 0,4 \text{ mm}$$

Lo stato limite di fessurazione deve essere fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione, come descritto nel seguito.

### **2.1. Combinazioni di Azioni (§ 4.1.2.2.4.1)**

Si prendono in considerazione le seguenti combinazioni:

- combinazioni quasi permanenti;
- combinazioni frequenti.

### **2.2. Condizioni Ambientali (§ 4.1.2.2.4.2)**

Ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche e della protezione contro il degrado del calcestruzzo, le condizioni ambientali possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive in relazione a quanto indicato nella Tab. 4.1.III con riferimento alle classi di esposizione definite nelle Linee Guida per il calcestruzzo strutturale emesse dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nonché nella UNI EN 206:2016 .

**Tab. 4.1.III – Descrizione delle condizioni ambientali**

Condizioni ambientali	Classe di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

### **2.3. Sensibilità delle armature alla corrosione (§ 4.1.2.2.4.3)**

Le armature si distinguono in due gruppi:

- armature sensibili;
- armature poco sensibili.

Appartengono al primo gruppo gli acciai da precompresso.

Appartengono al secondo gruppo gli acciai ordinari.

Per gli acciai zincati e per quelli inossidabili, si può tener conto della loro minor sensibilità alla corrosione sulla base di documenti di comprovata validità.

## 2.4. Scelta degli stati limite di fessurazione (§ 4.1.2.2.4.4)

Nella Tab. 4.1.IV sono indicati i criteri di scelta dello stato limite di fessurazione con riferimento alle esigenze sopra riportate.

**Tabella 4.1.IV – Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione**

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	$w_d$	Stato limite	$w_d$
a	Ordinarie	frequente	ap. fessure	$\leq w_2$	ap. fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
b	Aggressive	frequente	ap. fessure	$\leq w_1$	ap. fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$
c	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	ap. fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	ap. fessure	$\leq w_1$

$w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  sono definiti al § 4.1.2.2.4, il valore  $w_k$  è definito al § 4.1.2.2.4.5

## 2.5. Verifica dello stato limite di fessurazione (§ 4.1.2.2.4.5)

*Stato limite di decompressione e di formazione delle fessure*

Le tensioni sono calcolate in base alle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione omogeneizzata non fessurata.

*Stato limite di apertura delle fessure*

Il valore caratteristico di apertura delle fessure ( $w_k$ ) non deve superare i valori nominali  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  secondo quanto riportato nella Tab. 4.1.IV.

L'ampiezza caratteristica delle fessure  $w_k$  è calcolata come 1,7 volte il prodotto della deformazione media delle barre d'armatura  $\epsilon_{sm}$  per la distanza media tra le fessure  $\Delta_{sm}$ :

$$w_k = 1,7 \epsilon_{sm} \Delta_{sm} \quad (4.1.14)$$

Per il calcolo di  $\epsilon_{sm}$  e  $\Delta_{sm}$  vanno utilizzati criteri consolidati riportati in documenti di comprovata validità.

La verifica dell'ampiezza di fessurazione può anche essere condotta senza calcolo diretto, limitando la tensione di trazione nell'armatura, valutata nella sezione parzializzata per la combinazione di carico pertinente, ad un massimo correlato al diametro delle barre ed alla loro spaziatura.

## 2.6. Calcolo dell'ampiezza delle fessure (art. C.4.1.2.2.4.5)

Come indicato al punto C. 4.1.2.2.4.5 della Circolare 21/01/2019 n.7 C.S.LL.PP., "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

La deformazione unitaria media delle barre  $\epsilon_{sm}$  può essere calcolata con l'espressione:

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} (1 + \alpha_e \rho_{eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad [C4.1.6]$$

in cui:

$\sigma_s$  è la tensione nell'armatura tesa considerando la sezione fessurata;

$\alpha_e$  è il rapporto  $E_s/E_{cm}$ ;

$\rho_{eff}$  è pari a  $A_s/A_{c,eff}$ ;

$A_{c,eff}$  è l'area efficace di calcestruzzo teso attorno all'armatura, di altezza  $h_{c,ef}$ , dove  $h_{c,ef}$  è il valore minore tra  $2,5(h-d)$ ,  $(h-x)/3$  o  $h/2$  (vedere figura C.4.1.10); nel caso di elementi in trazione, in cui esistono due aree efficaci, l'una all'estradosso e l'altra all'intradosso, entrambe le aree vanno considerate separatamente;

$k_t$  è un fattore dipendente dalla durata del carico e vale:

$k_t = 0,6$  per carichi di breve durata,

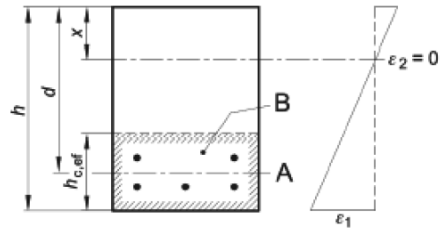
$k_t = 0,4$  per carichi di lunga durata,

Legenda

a) Trave

A Livello del baricentro dell'acciaio

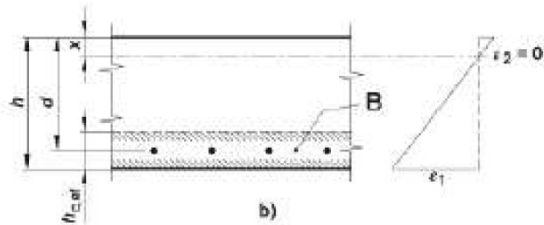
B Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$



a)

b) Piastra

B Area tesa efficace,  $A_{c,eff}$

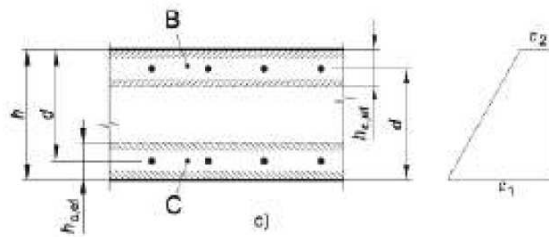


b)

c) Elemento in trazione

B Area tesa efficace di estradosso,  $A_{c,eff}$

C Area tesa efficace di intradosso,  $A_{c,eff}$



c)

Figura C4.1.10- Area tesa efficace. Casi tipici

Nei casi in cui l'armatura sia disposta con una spaziatura non superiore a  $5(c + \phi/2)$  (vedi Figura C4.1.11), la distanza media tra le fessure,  $\Delta_{sm}$ , può essere valutata con l'espressione:

$$\Delta_{sm} = (k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{eff}}) / 1,7 \quad [C4.1.7]$$

in cui:

$\phi$  è il diametro delle barre. Se nella sezione considerata sono impiegate barre di diametro diverso, si raccomanda di adottare un opportuno diametro equivalente,  $\phi_{eq}$ . Se  $n_1$  è il numero di barre di diametro  $\phi_1$  ed  $n_2$  è il numero di barre di diametro  $\phi_2$ , si raccomanda di utilizzare l'espressione seguente:

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2} \quad [C4.1.8]$$

$c$  è il ricoprimento dell'armatura;

$k_1 = 0,8$  per barre ad aderenza migliorata,

$= 1,6$  per barre lisce;

$k_2 = 0,5$  nel caso di flessione,

$= 1,0$  nel caso di trazione semplice.

In caso di trazione eccentrica, o per singole parti di sezione, si raccomanda di utilizzare valori intermedi di  $k_2$ , che possono essere calcolati con la relazione:

$$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2\varepsilon_1 \quad [C4.1.9]$$

in cui  $\varepsilon_1$  ed  $\varepsilon_2$  sono rispettivamente la più grande e la più piccola deformazione di trazione alle estremità della sezione considerata, calcolate considerando la sezione fessurata.

$k_3 = 3,4$

$k_4 = 0,425$ .

Nelle zone in cui l'armatura è disposta con una spaziatura superiore a  $5(c + \phi/2)$  (vedi Figura C4.1.11), per la parte di estensione  $5(c + \phi/2)$  nell'intorno delle barre la distanza media tra le fessure,  $\Delta_{sm}$ , può essere valutata ancora con l'espressione C4.1.7:

Nella parte rimanente la distanza media tra le fessure,  $\Delta_{sm}$ , può, invece, essere valutata con l'espressione:

$$\Delta_{sm} = 0,75 (h - x) \quad [C4.1.10]$$

in cui:

$h$  ed  $x$  sono definite in Figura C4.1.10;

$(h - x)$  è la distanza tra l'asse neutro ed il lembo teso della membratura.

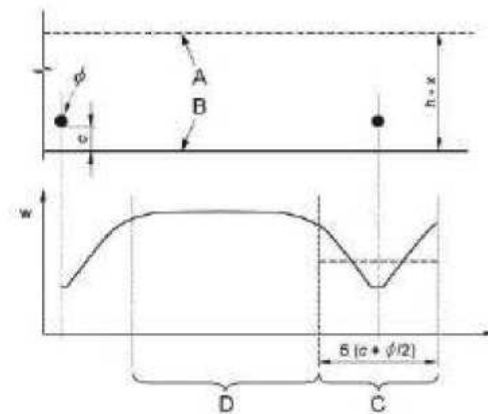
**Legenda:**

A Asse neutro

B Superficie del calcestruzzo teso

C Zona in cui si applica la formula [C.4.1.9]

D Zona in cui si applica la formula [C.4.1.12]



**Figura C4.1.11– Ampiezza delle fessure,  $w$ , in funzione della posizione rispetto alle barre di armatura**

## Esempio

### Geometria Sezione

B	300	mm			
H	600	mm			
c	30	mm			
h	570	mm			
As	615,75	mm <sup>2</sup>	4	φ 14	Armatura Tesa
A's	307,8761	mm <sup>2</sup>	2	φ 14	Armatura compressa
s	196	mm	distanza fra le barre		
Ec	31447,16	N/mm <sup>2</sup>			
Es	210000	N/mm <sup>2</sup>			
fcd	14,11	N/mm <sup>2</sup>	resistenza a compressione cls		
fctd	1,19	N/mm <sup>2</sup>	resistenza a trazione cls		
fctm	2,56	N/mm <sup>2</sup>	resistenza a trazione assiale cls		
M	117	kNm	Momento Flettente agente		

Posizione Asse neutro lembo superiore	xn	=	149,149651	mm	
Momento Statico Sez. Reag. Rispetto asse n.	Sn	=	0		
Momento Inerzia Sez. Reag. Rispetto asse n.	Jn	=	2033239015		
Tensione CLS -	σc	=	8,58	N/mm <sup>2</sup>	M*xn/Jn
Tensione acciaio - corrispondente fctm	σsn	=	363,26	N/mm <sup>2</sup>	n*sc*(H-xn)/xn

### Verifica Ampiezza Fessura

Valore limite	Wi	=	0,3	mm	
Fattore durata carico	kt	=	0,6		
Coefficiente tipo acciaio	k1	=	0,8		
Coefficiente per flessione	k2	=	0,5		
Coefficiente k3	k3	=	3,4		
Coefficiente k4	k4	=	0,425		
Altezza Efficace	hc	=	75	mm	
Area efficace	Ac,ef	=	22500,00	mm <sup>2</sup>	
Rapporto geometrico Area Efficace	ρr	=	0,02737		
Diametro equivalente Barre acciaio	F	=	14		
Distanza media fessure	Δsm	=	111,157	mm	
Deformazione unitaria	εsm	=	0,001414		
Ampiezza Fessura	Wk	=	0,267	mm	VERIFICA