

Strutture in calcestruzzo leggero



Ing. Paolo Formichi

Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa

Contenuti

- Cenni alla normativa italiana preesistente
- Basi della progettazione secondo EC2
- Caratteristiche meccaniche del materiale secondo l'EC2
- Durabilità
- Esempi
- Specifiche per SLU e SLE
- Dettagli per le armature
- Conclusioni

Il calcestruzzo leggero strutturale nel quadro normativo vigente

Circ. Min. LL.PP. 15.10.96 n. 252 AA.GG./S.T.C., paragrafo E
“Strutture in conglomerato cementizio con armatura normale o di precompressione e confezionato con aggregati leggeri artificiali”

1. Si tratta di **modifiche ed integrazioni** alle prescrizioni della parte I del DM 09.01.96, valide per le opere in calcestruzzo ordinario;
2. Le istruzioni sono riferite ai soli calcestruzzi leggeri confezionati con **aggregati artificiali**
3. E' obbligatoria una campagna sperimentale preliminare alla realizzazione, per calibrare i parametri meccanici del materiale.

Il calcestruzzo leggero strutturale nelle Norme Tecniche per le Costruzioni

D.M. 14.09.05 “Norme tecniche per le costruzioni”

Capitolo 11 – Materiali e prodotti per uso strutturale

11.1.9.2. Aggregati

*Sono idonei alla produzione di conglomerato cementizio gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di **materiali naturali, artificiali**, ovvero provenienti da processi di riciclo....
.... Per quanto riguarda gli **aggregati leggeri**, questi devono essere conformi alla parte armonizzata della norma europea UNI EN 13055. Il sistema di attestazione della conformità (per calcestruzzi leggeri ad uso strutturale) è il 2+”*

Nel processo di **revisione e aggiornamento delle Norme Tecniche** è prevista una più ampia sezione dedicata agli inerti per il confezionamento dei calcestruzzi strutturali, tra i quali gli inerti **leggeri**.

Coerentemente con l'impostazione “prestazionale” delle norme, il progettista è libero di riferirsi a “*norme di comprovata validità*” per il calcolo e l'esecuzione di strutture in calcestruzzo leggero strutturale.



EUROCODICE 2

Il calcestruzzo leggero strutturale nell'Eurocodice 2

EN 1992-1-1:2005

Eurocodice 2 – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici

Il **Capitolo 11** è interamente dedicato alle “*Strutture di calcestruzzo con aggregati leggeri*”

Il testo è molto aggiornato e recepisce i risultati scientifici più recenti, i più significativi dei quali sono stati sviluppati in ambito *fib*

EUROCODICE 2

Capitolo 11 – Strutture in Calcestruzzo Leggero Strutturale

11.1 Generalità

11.2 Basi della progettazione

11.3 Materiali

11.4 Durabilità

11.5 Analisi strutturale

11.6 Stati Limite Ultimi

11.7 Stati Limite di Servizio

11.8 Dettagli per le armature

11.9 Dettagli per le membrane e regole particolari

11.10 Regole aggiuntive per strutture prefabbricate

11.11 Strutture debolmente o non armate

EC2 – 11.1 Generalità

1. Per calcestruzzo leggero strutturale si intende un calcestruzzo a matrice compatta con **massa volumica non superiore a 2200 kg/m^3** , ottenuto con aggregati **naturali** o **artificiali**, la cui massa volumica dei granuli sia inferiore a 2000 kg/m^3 .
2. I calcestruzzi areati o a struttura aperta sono al di fuori dello scopo di questa parte dell'EC2
3. Le prescrizioni contenute nei capitoli da 1 a 10 e 12 dell'EC2 sono applicabili ai calcestruzzi leggeri con le integrazioni fornite nel capitolo 11-EC2



Aggregati **naturali**
(es. pomice)



Aggregati **artificiali** (es. argilla espansa)

EC2 – 11.2 Basi della progettazione

Per le strutture in calcestruzzo leggero si applicano, **senza modifiche**, le indicazioni contenute nel **capitolo 2-EC2**, relative criteri generali di progettazione.

Tra gli altri trovano applicazione i concetti generali relativi a:

- affidabilità, vita utile, principi di progettazione agli stati limite
- azioni e criteri di combinazione
- il fattore parziale di sicurezza γ_c , viene mantenuto pari a:
 - $\gamma_c = 1,5$ per le condizioni di carico persistenti e transitorie
 - $\gamma_c = 1,2$ per le condizioni di carico eccezionali

EC2 – 11.3 Materiali

A differenza del calcestruzzo ordinario, per il calcestruzzo leggero, oltre alla **resistenza caratteristica a compressione**, l'altro parametro fondamentale che ne condiziona il calcolo è la **massa volumica**.

Le classi di massa volumica dopo essiccazione in stufa (UNI EN 12390-7) sono individuate nella EN 206-1 e recepite tal quali nell'EC2.

Classe di resistenza a compressione	Resistenza caratteristica cilindrica minima f_{lck} [N/mm ²]	Resistenza caratteristica cubica minima $f_{lck,cube}$ [N/mm ²]
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
...	...	...
LC 80/88	80	88

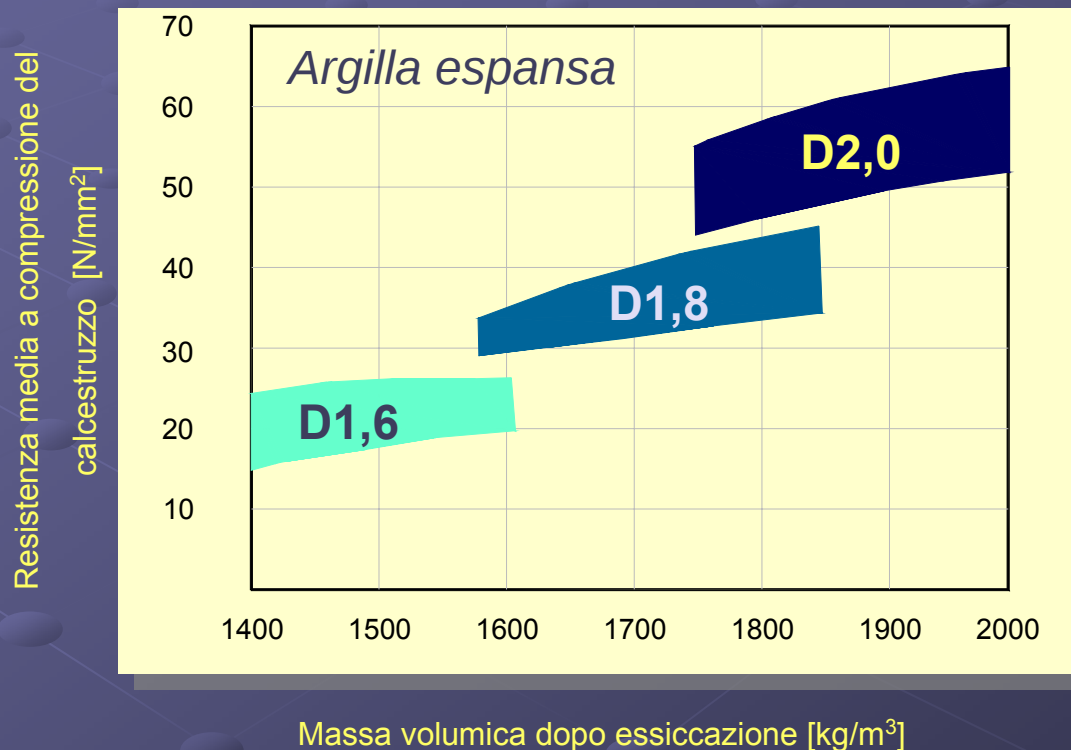
Classe di massa volumica	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Intervallo di massa volumica [kg/m ³]	800 < ρ ≤1000	1000 < ρ ≤1200	1200 < ρ ≤1400	1400 < ρ ≤1600	1600 < ρ ≤1800	1800 < ρ ≤2000
Massa volumica cls. non armato [kg/m ³]	1050	1250	1450	1650	1850	2050
Massa volumica cls. armato [kg/m ³]	1150	1350	1550	1750	1950	2150

EC2 – 11.3 Materiali

Rapporto tra resistenza a compressione e massa volumica

A valori **decrescenti della massa volumica** si associano **valori minori di resistenza compressione del calcestruzzo**.

La diminuzione della massa volumica in mucchio dei granuli è accompagnata dalla diminuzione della loro resistenza allo schiacciamento.



Gli aggregati leggeri rappresentano mediamente il **65%-70%** del volume totale degli inerti, la parte rimanente è composta da **sabbie fini** (0-3 mm), per garantire una **curva granulometrica omogenea** degli aggregati.

EC2 – 11.3 Materiali

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali

Valore medio della **resistenza a trazione semplice** (assiale):

- per calcestruzzo di classe $\leq$ LC 50/55

$$f_{lctm} = 0,30 f_{lck}^{2/3} \eta_1$$

Dove:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho/2200$$

ρ = **valore limite superiore della massa volumica del calcestruzzo**, per la classe di massa volumica di appartenenza in kg/m^3

Modulo elastico secante a compressione
a 28 giorni:

$$E_{lcm} = 22000 \left[\frac{f_{lcm}}{10} \right]^{0,3} \eta_E$$

Dove:

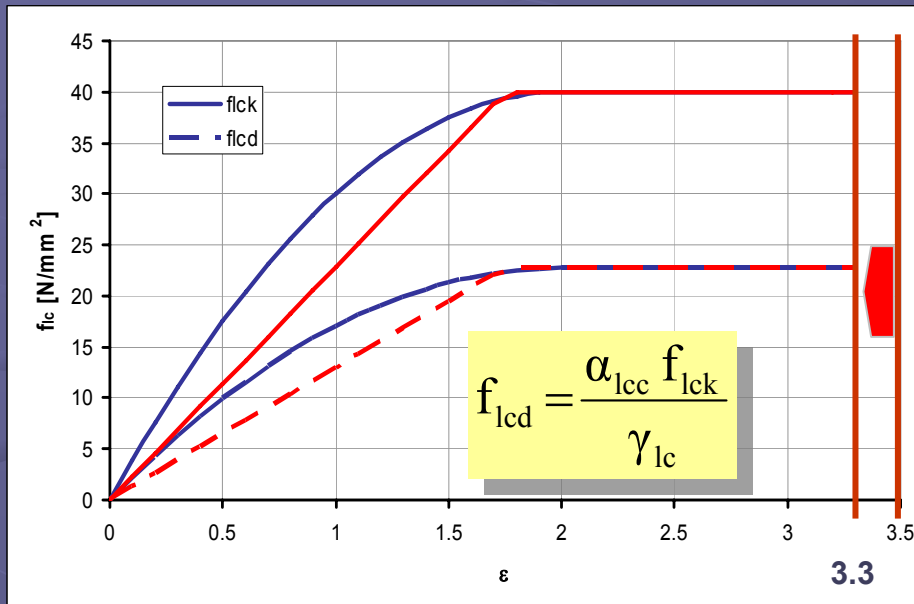
$$\eta_E = (\rho/2200)^2$$

ρ = **valore limite superiore della massa volumica del calcestruzzo**, per la classe di massa volumica di appartenenza in kg/m^3

EC2 – 11.3 Materiali

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali

Legami semplificati
tensione – deformazione



$$f_{lck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$

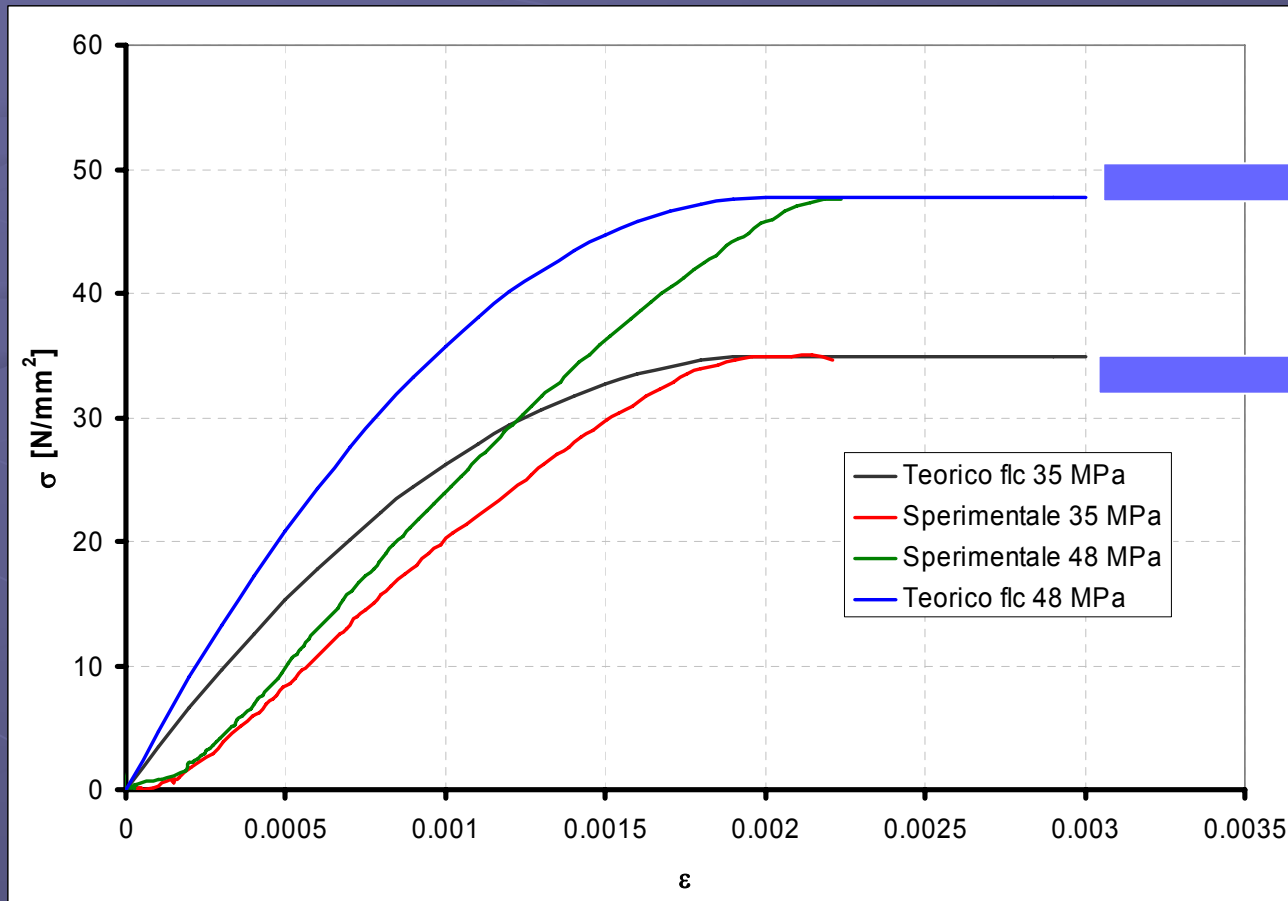
$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \rho/2200 = 0,94$$

1. Contrazione del ramo orizzontale con il decremento della massa volumica → minore duttilità
2. Non è consentito l'impiego del diagramma semplificato "stress-block"

	Classe di resistenza LC								
	16/18	20/22	25/28	30/33	35/38	40/44	45/50	50/55	55/60
$\epsilon_{lc2} (\text{‰})$	2,0								2,2
$\epsilon_{lcu2} (\text{‰})$	3,5 η_1								3,1 η_1

	Classe di resistenza LC								
	16/18	20/22	25/28	30/33	35/38	40/44	45/50	50/55	55/60
$\epsilon_{lc3} (\text{‰})$	1,75								1,8
$\epsilon_{lcu3} (\text{‰})$	3,5 η_1								3,1 η_1

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali – esempi



$f_{lc} = 48 \text{ N/mm}^2$

$\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$

$f_{lc} = 35 \text{ N/mm}^2$

$\rho = 1670 \text{ kg/m}^3$

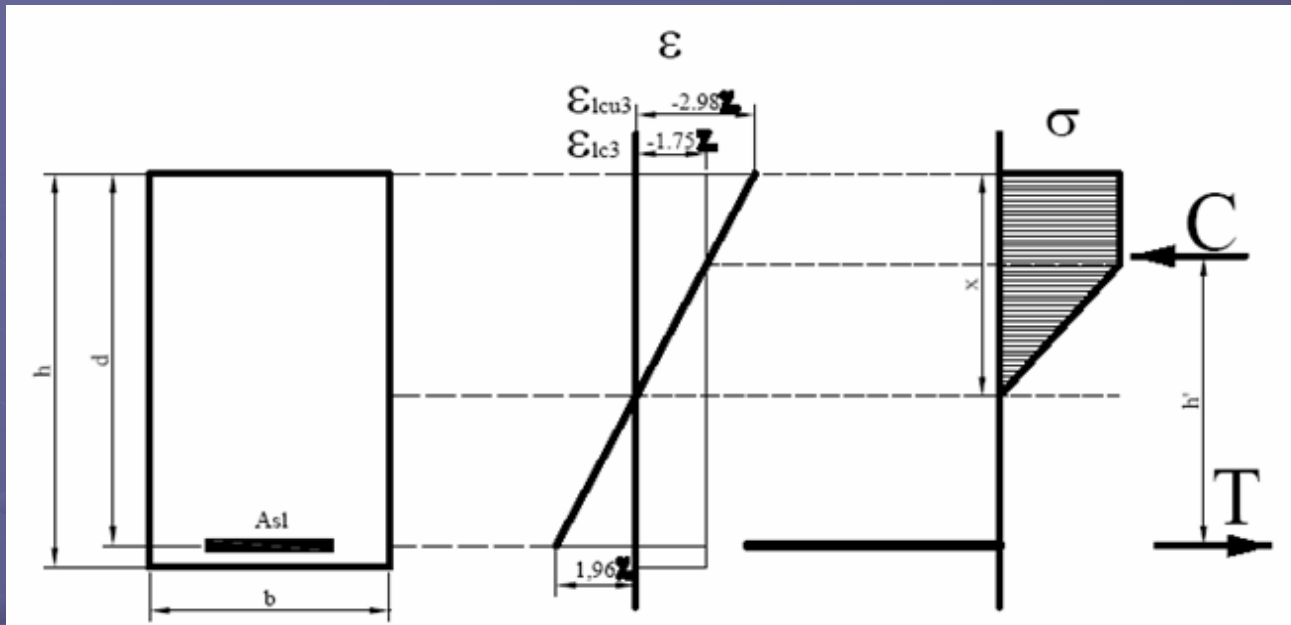
EC2 – 11.3 Materiali

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali

	Calcestruzzo tipo 1		Calcestruzzo tipo 2	
	Leggero	Ordinario	Leggero	Ordinario
$f_{lck} [N/mm^2]$	35		60	
$\rho [kg/m^3]$	1650	2400	2050	2400
$f_{lcm} [N/mm^2]$	43		68	
η_1	0,850	--	0,959	--
η_E	0,563	--	0,868	--
$f_{ctm} [N/mm^2]$	2,7	3,2	4,2	4,4
$f_{ctk;0,05} [N/mm^2]$	1,9	2,2	2,9	3,1
$f_{ctk;0,95} [N/mm^2]$	3,5	4,2	5,4	5,7
$E_{lcm} [N/mm^2]$	19168	34077	33950	39100

EC2 – 11.3 Materiali

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali



Dati di progetto

$$b = 30 \text{ cm}$$

$$h = 50 \text{ cm}$$

$$d = 47 \text{ cm}$$

$$f_{lck} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 1650 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_1 = 0,850$$

$$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{lc3} = 1,75 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{lcu3} = \eta_1 \cdot 3,5 = 2,98 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{yd} = f_{yk} / (1,15 E_s) = 1,96 \text{ ‰}$$

$$x = 28,3 \text{ cm}$$

$$C = T = 1185 \text{ kN} \quad A_{sl} = 3030 \text{ mm}^2$$

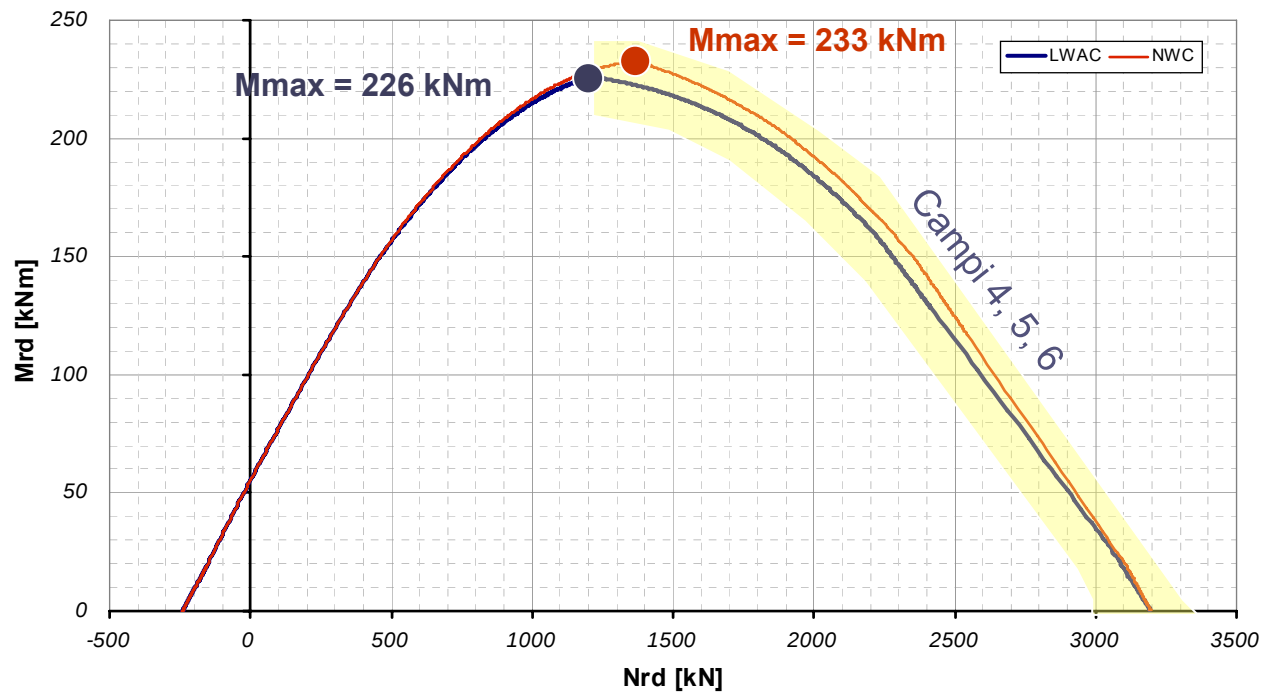
$$h' = 36,5 \text{ cm}$$



$$M_{Rd} = 1185 \times 0,365 = 432,5 \text{ kNm}$$

EC2 – 11.3 Materiali

Parametri meccanici dei calcestruzzi leggeri strutturali



Calcestruzzo leggero

$$f_{lck} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 1650 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_1 = 0,850$$

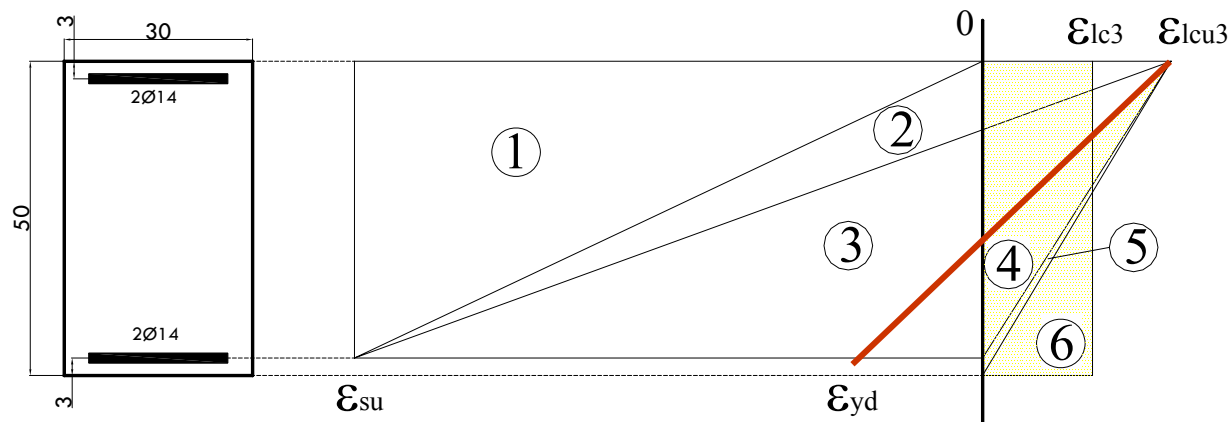
$$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$$

Calcestruzzo ordinario

$$f_{lck} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$$



EC2 – 11.4 Durabilità

Le classi di esposizione individuate per calcestruzzi ordinari valgono anche per i calcestruzzi leggeri.

L'unica significativa variazione nella progettazione di elementi in calcestruzzo leggero è costituita dalla prescrizione di **aumentare forfetariamente, per tutte le classi di esposizione, il copriferro di 5 mm** rispetto al valore corrispondente al calcestruzzo ordinario.

EC2 – 11.5 Stati Limite Ultimi

Le modalità di calcolo delle sezioni in c.a. e c.a.p. realizzate in calcestruzzo leggero non mutano rispetto al caso del calcestruzzo ordinario, se non in relazione ai **parametri** che concorrono a definire le **prestazioni meccaniche** del materiale, che qui sono influenzati anche dalla **massa volumica** del conglomerato.

Formulazione proposta per il calcolo del taglio resistente di progetto $V_{IRd,c}$, per un elemento sprovvisto di armatura resistente a taglio (solette, piastre e membrature analoghe)

$$V_{IRd,c} = \left[C_{IRd,c} \eta_1 k (100 \rho_l f_{lck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{l,min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \rho / 2200$$

EC2 – 11.6 Stati Limite di Servizio

Anche in questo caso valgono, in generale, le prescrizioni adottate per i calcestruzzi ordinari.

La **principale differenza** tra le trattazioni consiste nella **riduzione dei limiti di deformabilità** delle membrature inflesse, in ragione del rapporto **luce/altezza della sezione, attraverso il coefficiente correttivo $\eta_E^{0,15}$** , inferiore a 1, a sua volta funzione della **massa volumica** del calcestruzzo.

$$\eta_E = 0,53$$

$$\eta_E = 0,83$$

$$\eta_E^{0,15} = 0,90$$

$$\eta_E^{0,15} = 0,97$$

$$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$$



L'impiego di calcestruzzi con massa volumica via via decrescente deve essere accompagnato dalla riduzione dell'impegno tensionale delle membrature, di fatto accrescendone le sezioni resistenti

EC2 – 11.7 Dettagli per le armature

Al fine di evitare rotture delle zone di ancoraggio delle barre d'armatura, causate dalla diminuita capacità di adattamento plastico del conglomerato, è semplicemente prescritto di **aumentare** forfetariamente, nella misura **del 50%**, i **diametri dei mandrini di piega delle barre**

EC2 – 11.8 Dettagli per le membrane, regole particolari

Il massimo diametro ammesso in uso con calcestruzzo leggero è di **32 mm**. Il raggruppamento di barre non è consentito per più di due barre

Comportamento al fuoco

	CEB Bulletin n. 208	EN 1992-1-2:2004	
	Cls. Leggero di argilla espansa	Cls. Ordinario Con aggregati silicei	Cls. Ordinario Con aggregati calcarei
temperatura del calcestruzzo θ (°C)	$f_{lc,\theta} / f_{lck}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$
20	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00
200	1,00	0,95	0,97
300	1,00	0,85	0,91
400	0,88	0,75	0,85
500	0,76	0,60	0,74
600	0,64	0,45	0,60
700	0,52	0,30	0,43
800	0,40	0,15	0,27

Conclusioni

1. L'EC2, nel Capitolo 11, contiene integrazioni e modifiche alle prescrizioni valide per il calcestruzzo ordinario.
2. Le integrazioni e modifiche sono poche e sostanzialmente riconducibili alla necessità della doppia specifica, da parte del Progettista, della **resistenza caratteristica a compressione** del conglomerato e della sua **massa volumica**.
3. La correlazione tra resistenza a compressione e massa volumica è funzione del tipo di aggregato ed è ampiamente documentata in Letteratura.
4. E' possibile prescindere, almeno nella fase progettuale, dall'esecuzione una campagna sperimentale di pre-calibrazione dei parametri meccanici del materiale.
5. Le modificazioni delle proprietà meccaniche del conglomerato al diminuire della sua massa volumica, soprattutto quelle legate alla deformabilità, sono tali da rendere questo materiale indicato per essere utilizzato in membrane strutturali in cui lo stato tensionale si mantenga mediamente basso.