

# CALCESTRUZZI STRUTTURALI AD ALTA RESISTENZA

Marco BOZZA \*

\* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

## INTRODUZIONE

I calcestruzzi vengono suddivisi in 3 categorie, a seconda del rapporto acqua/cemento (a/c) e della loro resistenza caratteristica cubica  $R_{ck}$ :

- **CALCESTRUZZO A RESISTENZA NORMALE (NR):**  
*conglomerato cementizio caratterizzato in generale da  $a/c > 0,45$  e con  $R_{ck} \leq 55 \text{ N/mm}^2$ ;*
- **CALCESTRUZZO AD ALTE PRESTAZIONI (AP):**  
*conglomerato cementizio caratterizzato in generale da  $a/c < 0,45$  e con  $55 < R_{ck} \leq 75 \text{ N/mm}^2$ ;*
- **CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA (AR):**  
*conglomerato cementizio caratterizzato in generale da  $a/c < 0,35$  e con  $75 < R_{ck} \leq 115 \text{ N/mm}^2$ .*

## Generalità sui calcestruzzi AR

I calcestruzzi AR sono ottenuti utilizzando i materiali ordinari e la tecnologia convenzionale di produzione, di posa in opera e di stagionatura. I calcestruzzi AR sono caratterizzati da basso rapporto in peso acqua/legante (a/l), da alto dosaggio di legante, dall'impiego di aggiunte minerali (materiali inorganici idraulicamente attivi (loppa granulata d'altoforno) o reattivo verso l'idrossido di calcio (ceneri volanti, argille calcinate, pozzolane naturali, microsilice, silice precipitata), che intervengono sulle caratteristiche fisico-meccaniche e sulla durabilità del calcestruzzo) e di additivi chimici superfluidificanti, spesso combinati con ritardanti. Il dosaggio del legante varia nell'intervallo  $400 \div 550 \text{ Kg/m}^3$  e rappresenta il totale del cemento Portland più le aggiunte minerali attive. Il rapporto a/l è generalmente nell'intervallo  $0,25 \div 0,35$  ma sono stati prodotti impasti con rapporto inferiore a 0,25; spesso al rapporto a/l si abbina quello fra acqua e cemento Portland, a/c.

Affinché ai bassi valori del rapporto a/l il legante possa essere omogeneamente disperso nell'impasto, è indispensabile l'uso di un efficace superfluidificante. I materiali e i rapporti di composizione per il calcestruzzo AR sono scelti sulla base di prove di laboratorio. Lo studio degli impasti di prova per la determinazione dei rapporti ottimali richiede lavoro sperimentale. Nella scelta dei materiali localmente disponibili (cemento, aggregato, aggiunte minerali, additivi) l'obiettivo è la ricerca dei componenti che manifestino il massimo di compatibilità. Tale compatibilità può essere valutata (a) attraverso la «resa» di resistenza meccanica a compressione (cioè la resistenza per unità di peso di cemento, o di legante, ad una assegnata stagionatura), e/o (b) in termini di slump, e di mantenimento di un dato livello di slump per un prefissato periodo di tempo.

Individuati i materiali ed i rapporti ottimali di composizione, occorre accertare che i risultati di laboratorio possano essere riprodotti nella particolare situazione di cantiere, e soltanto dopo che tutte le procedure siano state definite si compila il dettaglio del piano di assicurazione della qualità. A differenza di quanto avviene per il calcestruzzo NR, è stato constatato che per ottenere una soddisfacente riproducibilità è necessario che nelle prove di resistenza a compressione le tolleranze relative alle dimensioni dei provini siano più strette, e che nelle prove di resistenza a flessione i provini siano umidificati fino alla conclusione della prova.

## COMPORTEAMENTO MECCANICO

Il comportamento meccanico del calcestruzzo AR è per alcuni aspetti differente da quello del calcestruzzo normale. Le differenze hanno origine dalla notevole diversità delle loro microstrutture. Perciò le proprietà meccaniche del calcestruzzo AR non possono essere dedotte per estrapolazione da quelle del calcestruzzo normale, né è corretto applicare tout-court le relazioni tra la resistenza a compressione e le altre proprietà meccaniche, così come sono state sviluppate per i calcestruzzi normali.

Nel calcestruzzo di elevato rapporto a/c la microstruttura della matrice legante è caratterizzata da una elevata porosità capillare e dalla presenza di una zona d'interfaccia con l'aggregato grosso (spessore medio  $50 \mu\text{m}$ ), che differisce dalla matrice indisturbata (lontana dall'aggregato) per composizione, morfologia densità. La zona d'interfaccia, detta anche *zona di transizione*, si distingue per la maggiore dimensione media dei pori e per la presenza, nella fascia contigua all'aggregato, di cristalli - orientati e ben sviluppati - di idrossido di calcio (portlandite) e di bastoncini di trisolfatoalluminato idrato (ettringite).

A causa della notevole difettosità della zona di transizione vi è poco trasferimento di carico tra matrice legante e aggregato, e di conseguenza le proprietà dell'aggregato non influiscono in modo significativo su quelle della matrice legante. Quest'ultima rappresenta l'anello debole del sistema e quindi da sola caratterizza il comportamento meccanico

del materiale. Pertanto il calcestruzzo normale può essere visto come un materiale, costituito da inclusioni molto rigide e resistenti (aggregato) e da una matrice assai deformabile e porosa (la malta cementizia). Esercitando tuttavia l'aggregato un effetto di contenimento quasi isotropo sulla malta (almeno in compressione), si può dire che a livello macroscopico il comportamento del calcestruzzo sia assimilabile a quello di un materiale elastico-lineare-omogeneo-isotropo (per stati tensionali e deformativi abbastanza bassi), in cui tutte le proprietà meccaniche (ad esempio modulo elastico e resistenza a trazione) dipendono dalla resistenza a compressione, attraverso leggi semplici.

A maggior ragione può essere considerato elastico-lineare-omogeneo-isotropo il calcestruzzo AR, in cui - grazie alle ottime qualità della malta cementizia (compatta, rigida, resistente) - non vi sono rilevanti differenze di proprietà meccaniche fra malta e aggregato, al punto che il comportamento elastico-lineare in compressione si mantiene anche per stati tensionali e deformativi piuttosto alti (fin quasi alla soglia della resistenza in compressione). Il trasferimento di carico fra matrice e aggregato grosso è facilitato dalla minore difettosità ed estensione della zona di transizione, la quale tende addirittura a scomparire, quando parte del cemento è sostituita da fumo di silice.

Mentre le proprietà del calcestruzzo normale sono influenzate solo da quelle della malta, nel calcestruzzo AR giocano ruoli importanti sia la malta sia l'aggregato: la resistenza a compressione aumenta al diminuire del rapporto a/c fino a quando la resistenza allo schiacciamento dell'aggregato non diventi l'anello debole del sistema. A questo punto, per aumentare ulteriormente la resistenza a compressione attraverso la diminuzione del rapporto a/c, occorre cambiare aggregato ed usarne uno più resistente.

A tal proposito si può dire che per impasti con rapporti a/c uguali a 0,6 e a 0,3, le differenze microstrutturali sono nette; nell'intervallo da 0,5 a 0,35 il passaggio dall'una all'altra situazione evolve in maniera abbastanza continua. Certo è che la presenza del fumo di silice migliora decisamente la microstruttura, in particolare all'interfaccia aggregato-pasta di cemento.

## PROPRIETÀ MECCANICHE

Come nel caso del calcestruzzo normale, le proprietà meccaniche fondamentali sono: la resistenza a compressione  $f_c$ , la resistenza a trazione  $f_{ct}$ , il modulo elastico  $E_c$  e il coefficiente di contrazione trasversale  $\nu_c$ .

### Resistenza a compressione

I calcestruzzi sono classificati e designati in base alla resistenza caratteristica a compressione. La designazione è indicata da 2 valori, che corrispondono rispettivamente alle resistenze caratteristiche riferiti a cilindri ( $f_{ck}$ ) e a cubi ( $f_c$ ). Alla valutazione della resistenza in compressione continuano a prestarsi ugualmente bene i provini cubici e quelli cilindrici, che possono anche essere di dimensioni piuttosto piccole. Tali dimensioni sono giustificate dalle caratteristiche meccaniche più omogenee della microstruttura dei calcestruzzi AR, che consentono di adottare provini di minori dimensioni, con il grande vantaggio di poter usare le stesse presse utilizzate per i calcestruzzi NR.

Per quanto riguarda il rapporto fra resistenza cilindrica e resistenza cubica, il suo valore si avvicina a 0,9, in quanto il comportamento decisamente lineare fin quasi al picco della curva sforzo-deformazione, senza aumento del modulo di Poisson apparente, limita l'effetto di contenimento che le testate della pressa esercitano sul provino, effetto che è la principale causa della maggiore resistenza del cubo rispetto al cilindro. Infine, in mancanza di dati provenienti dal controllo di qualità, si adotta anche per i calcestruzzi AR 8 N/mm<sup>2</sup> lo scarto fra resistenza media  $f_c$  e resistenza caratteristica  $f_{ck}$  in compressione cilindrica:

$$(1) \quad f_c = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$$

### Resistenza a trazione

I calcestruzzi AR mostrano proporzionalmente una minore crescita della resistenza a trazione in funzione di quella a compressione, rispetto ai calcestruzzi NR. Per la resistenza media a trazione nei calcestruzzi AR si può fare riferimento alla relazione proposta dal Codice-Modello MC90:

$$(2) \quad f_{ct} = 0,32 \cdot f_c^{0,6} \quad f_{ck} = 35 \div 115 \text{ N/mm}^2$$

I frattili (inferiore, 5%, e superiore, 95%) possono assumersi rispettivamente pari a  $f_{ctk,min} = 0,68 f_{ct}$  e  $f_{ctk,max} = 1,32 f_{ct}$ . A titolo di esempio si vedano i valori contenuti nella Tabella 1.

RESISTENZA A TRAZIONE DIRETTA (N/mm <sup>2</sup> )						
$f_{ck}$	50	60	70	80	90	100
$f_{ct}$	3,66	4,02	4,37	4,70	5,01	5,31
$f_{ctk,min}$	2,49	2,73	2,97	3,20	3,41	3,61
$f_{ctk,max}$	4,83	5,31	5,77	6,20	6,61	7,00

Tabella 1

Per la resistenza media a trazione indiretta per spacco (prova brasiliana) si può fare riferimento alla seguente relazione:

$$(3) \quad f_{ct,sp} = 0,59 \cdot f_{cm}^{0,5} \quad f_{ck} = 35 \div 115 \text{ N/mm}^2$$

Pertanto il rapporto  $f_{ct}/f_{ct,sp}$  cade nell'intervallo  $0,82 \div 0,86$  per  $f_{ck} = 50 \div 100 \text{ N/mm}^2$ , prossimo al valore 0,9 suggerito per i calcestruzzi NR (MC90).

## MODULO ELASTICO

Il modulo di elasticità è una delle proprietà meccaniche fondamentali di qualsiasi materiale elastico-lineare, omogeneo e isotropo, e la sua conoscenza fornisce un dato essenziale per le applicazioni strutturali. Mentre nel caso dei materiali a microstruttura molto fine (ad esempio i materiali metallici) esiste in generale un esteso tratto iniziale della curva sforzo-deformazione ad andamento quasi perfettamente lineare, e quindi il modulo elastico (che ne è la pendenza) può essere tabellato ed utilizzato senza alcun problema, nel caso dei materiali compositi che, come il calcestruzzo, hanno microstruttura fortemente disomogenea, il modulo elastico dipende da numerosi parametri. Essendo inoltre la curva sforzo-deformazione dei materiali compositi in generale non lineare, il modulo elastico va specificato o come pendenza iniziale della suddetta curva ( $E_{ci} = \text{modulo dinamico}$ ) o come pendenza media ( $E_c = \text{modulo secante}$ ). Nel caso del calcestruzzo il modulo elastico è funzione della resistenza a compressione, che a sua volta dipende dal tipo e dalla dimensione massima dell'aggregato, dai rapporti di composizione dell'impasto e dalle condizioni di stagionatura.

Per evitare di ricorrere alla determinazione sperimentale, molti studi sono stati fatti nel passato per stabilire una semplice relazione fra modulo elastico e resistenza a compressione. Tali studi hanno avuto successo, tant'è che pressoché tutti i regolamenti propongono relazioni fra modulo e resistenza.

Anche per i calcestruzzi AR, come e ancor più che per i calcestruzzi NR, non vi è proporzionalità semplice fra modulo elastico e resistenza a compressione. Inoltre, mentre nei calcestruzzi NR il controllo delle proprietà meccaniche è strettamente legato alla pasta legante, e quindi il modulo elastico dipende poco dall'aggregato grosso, nei calcestruzzi AR (in particolare per  $f_c > 80 \text{ N/mm}^2$ ) è l'aggregato grosso ad influire decisamente sulle proprietà meccaniche, tant'è che impasti di resistenza simile possono avere moduli elastici diversi a causa del diverso aggregato.

Comunque le formulazioni della relazione modulo elastico - resistenza a compressione contenute nelle varie normative per calcestruzzi NR continuano a valere anche per i calcestruzzi AR, a condizione di ritrarre i coefficienti numerici. Ad esempio:

$$(4) \quad \text{BS 8110} \quad E_c = 175 f_c + 21.735 \text{ N/mm}^2$$

$$(5) \quad \text{ACI 318} \quad E_c = 2.782 \sqrt{f_c} + 10.958 \text{ N/mm}^2$$

$$(6) \quad \text{EC2 e MC90} \quad E_c = 8.261 \sqrt[3]{f_c} + 132 \text{ N/mm}^2$$

Ricordando che il rapporto  $E_{ci}/E_c$  è prossimo a 1,15, la relazione (6) conferma le relazioni proposte per il modulo dinamico da MC90 per i calcestruzzi AR:

$$(7) \quad E_{ci} = 11.000 \cdot f_c^{0,3}$$

Nella Tabella 2 si riportano i valori di  $E_{ci}$  ottenuti dalla (7), con  $f_c$  data dalla (1).

$f_{ck} [\text{N/mm}^2]$	50	60	70	80	90	100
$E_{ci} [\text{kN/mm}^2]$	37,2	39,0	40,6	42,1	43,5	44,8

Tabella 2

## COEFFICIENTE DI CONTRAZIONE TRASVERSALE

Se si limita l'attenzione al tratto iniziale sensibilmente lineare della curva sforzo-deformazione, i risultati sperimentali confermano la sostanziale identità di calcestruzzi AR e calcestruzzi NR ( $\nu_c = 0,18 \div 0,24$  per  $f_c$  crescente fino a  $60 \div 70 \text{ N/mm}^2$ ). Tuttavia, mentre nei calcestruzzi NR il modulo di Poisson apparente cresce rapidamente per valori tensionali  $\geq 0,80 f_c$ , a causa dell'estendersi della microfessurazione indotta dalla diversa deformabilità di malta legante e aggregato grosso, nei calcestruzzi AR la grande uniformità meccanica permette una maggiore estensione del tratto lineare (fino a  $0,90 \div 0,95 f_c$ ), garantendo la costanza del modulo di Poisson fin quasi al picco della curva  $\sigma_c - \epsilon_c$ . La minore espansione trasversale (dilatanza) dei calcestruzzi AR spiega la loro minore sensibilità al contenimento trasversale e quindi il loro comportamento meno favorevole in regime triassiale di compressione, rispetto ai calcestruzzi NR.

## COMPORAMENTO A FATICA

Il comportamento a fatica dei calcestruzzi è tuttora non completamente noto, e ciò vale a maggior ragione per i calcestruzzi AR, ove la presenza del fumo di silice modifica decisamente (e in meglio) le qualità fisico-meccaniche della pasta cementizia, del suo interfaccia con le particelle di aggregato e dell'aderenza con eventuali barre d'armatura o fibre di rinforzo.

Anche per i calcestruzzi AR le prove a frequenza, ampiezza di ciclo e valore medio assegnati (*prove di Wöhler*) permettono di ottenere le curve S-N (tensione di rottura a fatica S in funzione del numero di cicli N), che sono rappresentabili con spezzate. È così possibile valutare la vita a fatica  $\sigma_{\max}(N)$ , ovvero il limite di fatica  $\sigma_{\max}(N \rightarrow \infty)$ , quest'ultimo spesso assunto pari a  $0,3 \div 0,8 f_c$  (compressione semplice), ma i dati sperimentali sono ancora troppo scarsi.

L'applicazione della *regola di Miner*, detta del "*danno cumulativo*", trova per i calcestruzzi AR le stesse difficoltà che per i calcestruzzi NR, ed al momento si accetta per il numero di Miner il valore mediano prossimo a 0,5 in pura compressione. Sulla base delle ricerche svolte è possibile trarre le seguenti conclusioni, a seconda che il calcestruzzo non sia o sia armato:

### Calcestruzzo non armato

- *In compressione i calcestruzzi AR sembrano avere una vita a fatica maggiore dei calcestruzzi ordinari per elevati valori del rapporto  $\sigma_{\max}/f_c$  (sforzo massimo applicato in rapporto alla resistenza statica a compressione), mentre per valori bassi sembra verificarsi l'inverso; lo stesso avviene nella fatica a trazione, ma le differenze rispetto ai calcestruzzi ordinari sono minori;*
- *I calcestruzzi AR presentano minori deformazioni e minore caduta di rigidità per fatica (in termini di riduzione del modulo secante) rispetto ai calcestruzzi ordinari;*
- *Il comportamento biassiale in compressione perde le proprie caratteristiche di migliore resistenza (rispetto al comportamento uniassiale), dopo circa 50 cicli, per qualunque rapporto fra le tensioni principali applicate, e il dominio di rottura si riduce, assumendo una forma sempre più "quadrata" (resistenza in regime biassiale  $\approx$  resistenza in regime monoassiale);*
- *Il tenore di umidità del calcestruzzo ha molta influenza sul comportamento a fatica: con riferimento alla compressione semplice, i calcestruzzi AR (ad aggregato normale o leggero) hanno comportamento a fatica peggiore se il tenore di umidità è elevato (maturazione e prova in acqua), contrariamente ai calcestruzzi NR;*
- *Anche le condizioni ambientali e di prova influenzano notevolmente il comportamento a fatica dei calcestruzzi AR: ad esempio la pressione esterna d'acqua peggiora la vita a fatica, sia per materiale inizialmente integro che fessurato; inoltre la vita a fatica in aria è maggiore per i calcestruzzi di minore resistenza (ad esempio  $f_c = 60 \text{ N/mm}^2$ ), mentre l'opposto si verifica per i calcestruzzi di maggiore resistenza (ad esempio  $f_c = 110 \text{ N/mm}^2$ ), il tutto a parità di condizioni di maturazione.*

### Calcestruzzo armato

- *Nei pilastri armati in calcestruzzo AR, al rapido aumento degli spostamenti durante le prime migliaia di cicli segue una quasi totale stabilizzazione degli spostamenti, con loro aumento brusco solo prima della rottura; nei pilastri in calcestruzzo NR l'aumento degli spostamenti con il numero di cicli è più graduale;*
- *Negli elementi armati soggetti a carichi alternati (trazione + compressione), la fessurazione per trazione annulla il contributo resistente del calcestruzzo teso, più rapidamente nei calcestruzzi AR che nei calcestruzzi NR;*
- *Negli elementi inflessi, la presenza del fumo di silice aumenta nettamente la vita a fatica nel caso di aggregato leggero, grazie alla migliore aderenza fra la pasta cementizia, l'aggregato e l'armatura; se sono presenti fibre, gli effetti benefici di fumo di silice e fibre sono più che additivi.*

Per il calcolo della durata di vita (numero di cicli a rottura in presenza di determinati valori massimi e minimi di sforzo), ovvero per la verifica di resistenza a fatica (per un assegnato numero di cicli), si può fare riferimento ad un semplice modello del MC90:

$$(8) \quad \log N = 9 (1 - S_{c \max}) \quad \text{per } \sigma_t \leq 0,026 \sigma_c \text{ (rottura in compressione)}$$

$$(9) \quad \log N = 9 (1 - S_{t \max}) \quad \text{per } \sigma_t > 0,026 \sigma_c \text{ (rottura in trazione)}$$

dove:

$$(10) \quad S_{c \max} = \frac{\sigma_{c \max}}{f_c}$$

con  $\sigma_{c \max}$  = sforzo massimo di compressione applicato al calcestruzzo

$$(11) \quad S_{t \max} = \frac{\sigma_{t \max}}{f_{ct}}$$

con  $\sigma_{t \max}$  = sforzo massimo di trazione applicato al calcestruzzo.

Tale modello ha però i seguenti limiti:

- per  $\sigma_{min} = 0,10 f_{ct}$  il modello coglie per difetto i valori sperimentali della resistenza a fatica alternata;
- per  $\sigma_{min} = 0,30 f_{ct}$  il modello sovrastima fortemente la resistenza a fatica alternata;
- per  $\sigma_{min} = 0,50 f_{ct}$  il modello sottostima fortemente la resistenza a fatica alternata.