



PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO E PRECOMPRESSO A DURABILITÀ PROGRAMMATA

Mario Collepari

EN.CO srl mario.collepari@encosrl.it

Silvia Collepari

EN.CO srl silvia.collepari@encosrl.it

Roberto Troli

Betonrossi SpA robertotroli@betonrossi.it

SOMMARIO

Il presente articolo descrive le prescrizioni di capitolato che devono essere emanate dal progettista per assicurare una durabilità programmata di almeno 50 per le strutture in CA. Per raggiungere questo obiettivo ci si avvale delle Norme Europee che riguardano la lavorabilità del calcestruzzo fresco, la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo indurito e la durabilità delle strutture in calcestruzzo esposte agli agenti aggressivi ambientali. Secondo le norme Europee queste tre proprietà sono definite rispettivamente “classe di consistenza”, “classe di resistenza” e “classe di esposizione”. Sulla base di queste tre classi il progettista può emanare le prescrizioni di capitolato per il produttore del calcestruzzo nei confronti della resistenza meccanica e della lavorabilità, e per l’impresa responsabile del getto del calcestruzzo, per quanto riguarda il rispetto degli spessori di copriferro e della stagionatura del calcestruzzo dopo la rimozione delle casseforme.

Inoltre, il progettista deve emanare le raccomandazioni per il Direttore dei Lavori che controllerà:

- se le prestazioni del calcestruzzo fornito sono in accordo alle prescrizioni di capitolato;
- se l'impresa adotta gli opportuni distanziatori per ottenere i prescritti spessori di copriferro;
- se esegue il getto del calcestruzzo compattando a rifiuto il calcestruzzo fresco;
- se effettua un'appropriata stagionatura del calcestruzzo indurito dopo la rimozione delle casseforme.

L'articolo si completa con un esempio pratico sulle prescrizioni di capitolato riguardanti i pilastri in calcestruzzo armato e le travi in calcestruzzo armato precompresso che supportano un viadotto autostradale che corre non lontano dalla costa del mare e quindi esposto all'aerosol marino.

ABSTRACT

Specifications Requirements for Reinforced Concrete Structures with Planned Durability

The present paper describes the specifications requirements issued by the designer in order to guarantee a planned durability of at least 50 for the structures manufactured with reinforced concrete. To achieve such a goal one can take advantages of the European Norms dealing with the workability of the fresh concrete, the compressive strength of the hardened concrete and the durability of the concrete structures exposed to the environmental aggressive agents. According to the European Norms these three properties are respectively called "consistency class", "strength class" and "exposure class" respectively.

On the basis of these three classes the designer can issue the specifications requirements for the concrete producer (responsible for the consistency class and the strength class), and for the contractor responsible for the concrete placements, for the depth of the concrete cover and for the curing of the concrete surfaces after the removal of the formworks.

Moreover the designer can issue the recommendations to the technical supervisor to check:

- whether the requirements of the delivered concrete agree with those issued by the designer;*
- whether the contractor adopts the spacers needed to obtain the issued concrete cover depths;*
- whether the contractor places the fresh concrete by full compaction;*
- whether the contractor carries out the required wet curing of the concrete surfaces after the removal of the formworks.*

The paper finally contains a practical example on the specifications requirements dealing with the piles manufactured with reinforced concrete and the beams manufactured with prestressed reinforced concrete which support a highway viaduct built near the sea coast and then exposed to the airborne salt.

PAROLE CHIAVE | KEYWORDS

durabilità del calcestruzzo, resistenza caratteristica, rapporto acqua/cemento, spessore del copriferro

concrete durability, characteristic strength, water/cement ratio, minimum concrete cover

INTRODUZIONE

Nel presente articolo sono descritte le modalità per elaborare le prescrizioni di capitolato delle strutture in calcestruzzo armato secondo le Norme Europee 206-1 [1] e l'Eurocodice 2 [2] per la realizzazione di opere in calcestruzzo con una vita di servizio di 50 o 100 anni. L'argomento della durabilità delle strutture è stato esaminato da L. Bertolini [3] e da F. Lollini [4]. La vita di servizio richiesta in tutte le opere strutturali che non siano provvisorie è di 50 anni o 100 anni.

La Tabella 1 mostra i valori minimi di Vita Nominale (V_N) in anni in funzione dei tipi di costruzione secondo la Tabella 2.4.1 delle Norme Tecniche delle Costruzioni emanate dal Ministero con Decreto del 2017 [5].

Tabella 1. Valori minimi di Vita Nominale (V_N) di progetto.

TIPI DI COSTRUZIONI	Valori minimi di V_N in anni
Costruzioni temporanee o provvisorie	10
Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Le Norme Europee EN 206-1 come anche l'Eurocodice 2 rappresentano i più avanzati contributi alla realizzazione di opere in calcestruzzo con una vita utile di servizio di 50 anni e di 100 anni.

Le Norme Europee EN-206-1 sono basate sulla classificazione di tre importanti caratteristiche delle strutture in calcestruzzo:

- la lavorabilità del calcestruzzo fresco (nota come **classe di consistenza**) che deve essere prescritta dal progettista perché nessuno meglio di lui conosce la lavorabilità richiesta in funzione della difficoltà del getto dovuta alla eventuale congestione dei ferri di armatura, della forma ed della dimensione della struttura;
- la resistenza caratteristica a compressione a 28 giorni del calcestruzzo indurito (nota come **classe di resistenza**) che dipende dalle sollecitazioni che agiscono sulla struttura alle brevi ed alle lunghe stagionature; a seconda della resistenza del cemento impiegato, la **classe di resistenza** del calcestruzzo richiederà un determinato rapporto acqua/cemento qui indicato come **(a/c)₁**;
- la durabilità della struttura in calcestruzzo armato che richiede un rapporto a/c non superiore ad un certo valore qui indicato come **(a/c)₂**; questo valore dipenderà dall'ambiente dove la costruzione deve essere eretta, nota come "**classe di esposizione**", che a sua volta dipende dal tipo di agente aggressivo come l'anidride carbonica in aria umida, l'acqua del mare, il terreno ricco di sali solfatici, i cicli di gelo-disgelo, i sali disgelanti a base di cloruri, PH acido dell'acqua, ecc.

Il rapporto acqua/cemento che dovrà essere adottato per la produzione del calcestruzzo sarà il più basso tra **(a/c)₁** e **(a/c)₂** cosicché siano soddisfatti entrambi i requisiti della resistenza meccanica a compressione e della durabilità.

Di seguito sono descritte le prescrizioni di capitolato per i pilastri in C.A. e le travi in C.A.P. che sorreggono un viadotto autostradale non lontano dalla costa del mare e quindi esposto all'aerosol marino.

PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO PER I PILASTRI IN C.A. DI UN VIADOTTO AUTOSTRADALE

In questo paragrafo sono esaminati i pilastri in calcestruzzo armato di un viadotto autostradale, che corre ad una distanza inferiore a 500 m dalla costa marina nell'area del Mezzogiorno d'Italia, che per la sua importanza strategica richiede una vita nominale (V_n) di almeno 100 anni (Tabella 1).

Per la classe di consistenza (Tabella 2) il progettista prescrive una consistenza superfluida ($\text{slump} \geq 220$) per tener conto della elevata congestione dei ferri di armatura.

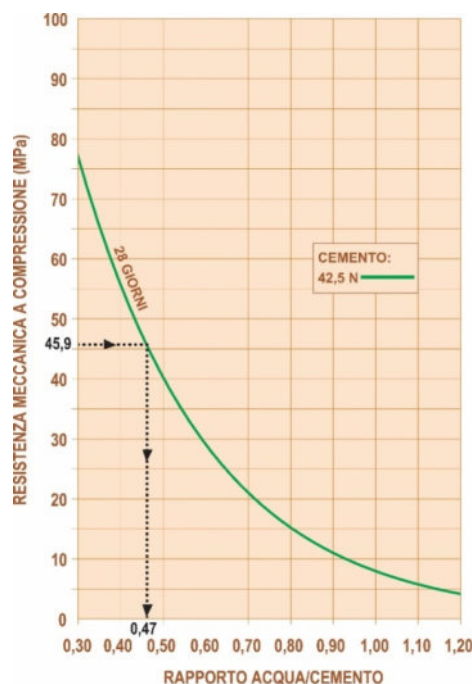
Per la classe di resistenza il progettista prescrive una R_{ck} di 40 MPa. Dal valore della R_{ck} si calcola [6] la resistenza a compressione media a 28 giorni (R_{cm28}) mediante la seguente equazione secondo il controllo di tipo B (NTC 11.25 Tabella 11.21):

$$R_{cm28} = 40 + 1,48 \cdot 4 = 45,9 \quad (1)$$

dove 4 (in MPa) è lo scarto quadratico medio del calcestruzzo. Dalla figura 1 [5] si ricava che il rapporto acqua/cemento - $(a/c)_1$ - che corrisponde ad una R_{cm28} di 45,9 quando si impiega un cemento di classe 42.5 N è pari a 0,47.

Tabella 2. Esempi di classe di consistenza richieste in funzioni di alcune applicazioni.

CLASSE CONSISTENZA	DI	SLUMP (mm)	APPLICAZIONE
S1 (rigida)		10-40	Calcestruzzi vibro-compattati
S2 (plastica)		50-90	Strutture cilindriche costruite con casseri rampanti
S3 (semifluida)		100-150	Strutture pendenti
S4 (fluida)		160-210	Strutture con armature congestionate
→ S5 (superfluida)		≥ 220	Strutture con armature molto congestionate e/o con forma complessa



1. R_{cm28} in funzione del rapporto acqua/cemento - $(a/c)_1$ - con un cemento di classe di resistenza 42.5 N.

Per quanto riguarda la classe di esposizione la Tabella 3 mostra che il massimo rapporto acqua/cemento $-(a/c)_2$ – è 0,50 ed è quindi maggiore di quello $(a/c)_1$ richiesto per la classe di resistenza (0,47) come mostrato in Figura 1.

Inoltre, lo spessore di copriferro per un calcestruzzo armato (35 mm per una durabilità di almeno 50 anni) diventa 45 mm se la durabilità programmata è di almeno 100 anni.

Tabella 3. Requisiti per calcestruzzo armato o precompresso durabile almeno 50 anni* in strutture esposte all’acqua di mare in accordo alle Norme Europee EN 206-1 e all’Eurocodice 2.

Classe di esposizione	Esempi dove la classe di esposizione può avvenire	Massimo a/c	Minimo spessore** di copriferro in mm	
			C.A.	C.A.P.
→ XS1	Strutture esposte all’aerosol marino ma non in diretto contatto con acqua di mare	→0.50	→35	45
XS2	Strutture continuamente sommerse in acqua di mare	0.45	40	50
XS3	Strutture discontinuamente esposte in acqua di mare	0.45	45	55

* Per strutture in calcestruzzo con una richiesta di durabilità di almeno 100 anni lo spessore minimo del copriferro deve essere aumentato di 10 mm.

**Spessore minimo del copriferro: C.A. = calcestruzzo armato; C.A.P. = calcestruzzo precompresso.

PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO E RACCOMANDAZIONI AL DIRETTORE DEI LAVORI

Di seguito sono mostrate le prescrizioni di capitolato emanate dal progettista per il produttore di calcestruzzo e l’Impresa, oltre che le raccomandazioni per il Direttore dei Lavori. La Tabella 4 mostra le prescrizioni di capitolato per il produttore di calcestruzzo. Esse riguardano:

- la resistenza caratteristica cubica (R_{ck}) che deve essere almeno 40 MPa;
- la lavorabilità del calcestruzzo fresco, in termini di slump, che deve essere almeno 220 mm al momento del getto;
- le caratteristiche degli ingredienti in accordo alle Norme Europee: tra questi è consigliabile prescrivere un aggregato con diametro massimo (D_{max}) di 32 mm (compatibile con lo spessore di copriferro di 45 mm) per ridurre l’acqua d’impasto [7] e, a pari rapporto a/c, anche il dosaggio del cemento, con conseguente minor rischio di fessure superficiali provocate dal ritiro igrometrico e dal gradiente termico tra nucleo più caldo e periferia più fredda per la dissipazione del calore di idratazione.

Tabella 4. Requisiti del calcestruzzo fornito.

R_{ck}	40 MPa
f_{ck}	35 MPa
Classe di consistenza sul cantiere	S5 con slump \geq 220 mm
Requisiti degli ingredienti del calcestruzzo:	
- Aggregati con D_{max} di 32 mm possono essere usati in accordo alla norma EN 12600 e secondo le locali disponibilità.	
- Acqua di impasto: può essere usata in accordo alla norma EN 1008.	
- Cemento: deve essere usato un cemento con classe di resistenza 42.5 N	
- Additivi chimici: possono essere usati in accordo alla norma EN 934-2.	

La Tabella 5 mostra le prescrizioni di capitolato che riguardano l'impresa. Esse richiedono:

- che lo spessore del copriferro richiesto per i pilastri in calcestruzzo armato del ponte autostradale esposto all'aerosol marino, con una durabilità programmata di almeno 100 anni, deve essere almeno 45 mm;
- che il calcestruzzo deve essere compattato a rifiuto, cosicché il grado di compattazione (cioè il rapporto tra la massa volumica del calcestruzzo in opera e quella dei provini di calcestruzzo, entrambi in condizioni di "saturi a superficie asciutta") deve essere almeno 0,97 per limitare la perdita di resistenza meccanica dei provini carotati dalla struttura rispetto ai corrispondenti provini cilindrici, che deve essere inferiore al 15 %; se il grado di compattazione è inferiore a 0,97, il Direttore dei Lavori deve informare il progettista affinché prenda le misure più appropriate: demolire la costruzione se il grado di compattazione è molto basso (per esempio nell'intervallo di 0,90-0,80) oppure rinforzare le strutture in calcestruzzo, per esempio mediante incremento degli spessori della struttura, in caso di un grado di compattazione basso ma accettabile come per esempio quello nell'intervallo 0,96-0,95;
- che il calcestruzzo deve essere stagionato per almeno 4 giorni dopo la rimozione delle casseforme a 3 giorni oppure protetto dall'evaporazione dell'acqua mediante l'applicazione di un agente stagionante subito dopo aver rimosso le casseforme a tre giorni.

La Tabella 5 riassume tutte queste prescrizioni di capitolato.

Tabella 5. Prescrizioni per l'impresa.

- I distanziatori debbono essere posizionati in modo che lo spessore del copriferro sia almeno 45 mm in accordo all'Eurocodice 2, la classe di esposizione (XS1), il tipo di struttura in CA, e il requisito di durabilità programmata in almeno 100 anni.
- Il calcestruzzo deve essere costipato in modo che il grado di compattazione sia almeno 0,97.
- Il calcestruzzo indurito deve essere stagionato a umido per almeno 4 giorni dopo la scasseratura a 3 giorni oppure protetto con un agente stagionante.

Il Direttore dei Lavori, o una persona da lui delegata, deve assistere al getto del calcestruzzo per:

- accertare che la classe di consistenza sia superfluida (S5) come prescritto dal progettista;
- verificare che i distanziatori siano posizionati dall'impresa in modo prescritto dal progettista;
- prelevare provini cubici o cilindrici del calcestruzzo per eseguire le misure di massa volumica e di resistenza caratteristica presso un laboratorio autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti;
- misurare mediante prove non-distruttive (come quelle basate sulla sclerometria) la resistenza meccanica sulla superficie della struttura ed eventualmente prelevare micro-carote (con l'ausilio di un pacometro per non intaccare i ferri di armatura) nelle aree che risultino meccanicamente più deboli al fine di determinare il grado di compattazione;
- accertare che le superfici del calcestruzzo siano stagionate a umido dall'impresa per almeno 4 giorni dopo la rimozione dei casseri oppure siano protette con agenti stagionanti.

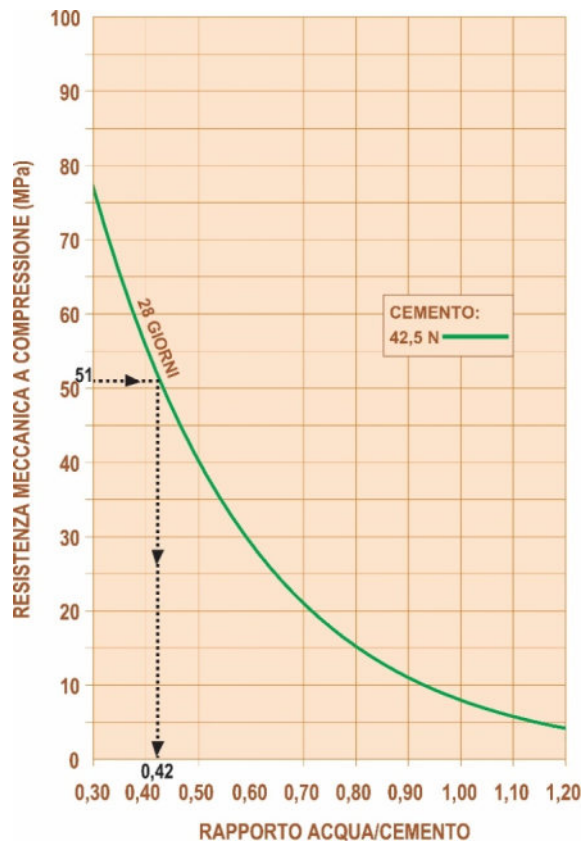
PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO PER TRAVI IN C.A.P. DI UN VIADOTTO AUTOSTRADALE

In questo paragrafo sono esaminati le travi in calcestruzzo armato precompresso dello stesso viadotto autostradale illustrato nel precedente paragrafo. Anche per le travi in C.A.P. la classe di consistenza prescritta dal progettista è S5 con uno slump ≥ 220 mm per tener conto della elevata congestione de ferri di armatura.

Per la classe di resistenza il progettista ha prescritto una R_{ck} di 45 MPa. Dal valore della R_{ck} si calcola [8] la resistenza a compressione media a 28 giorni (R_{cm28}) pari a 51 MPa mediante l'equazione (2):

$$R_{cm28} = 45 + 1,48 \cdot 4 = 51 \text{ MPa} \quad (2)$$

Dalla figura 2 si ricava che il rapporto acqua/cemento - $(a/c)_1$ - che corrisponde ad una R_{cm28} di 51 MPa quando si impiega un cemento di classe 42.5 N è pari a 0,42 [7].



2. R_{cm28} in funzione del rapporto acqua/cemento - $(a/c)_1$ - con un cemento di classe di resistenza 42.5 N.

Per la classe di esposizione (XS1) si ricava che per le travi in C.A.P. con una durabilità programmata di 100 anni (come si ricava dalla Tabella 1 lo spessore essere almeno 55 mm.

Tabella 6. Requisiti per calcestruzzo armato o precompresso durabile almeno 50 anni* in strutture esposte all'acqua di mare in accordo alle Norme Europee EN 206-1 e all'Eurocodice 2.

Classe di esposizione	Esempi dove la classe di esposizione può avvenire	Massimo a/c	Minimo spessore** di copriferro in mm	
			C.A.	C.A.P.
→ XS1	Strutture esposte all'aerosol marino ma non in diretto contatto con acqua di mare	→0.50	35	→ 45
XS2	Strutture continuamente sommerse in acqua di mare	0.45	40	50
XS3	Strutture esposte discontinuamente in acqua di mare (alta-bassa marea)	0.45	45	55

* Per strutture in calcestruzzo con una richiesta di durabilità di almeno 100 anni lo spessore minimo del copriferro deve essere aumentato di 10 mm

**Spessore minimo del copriferro: C.A.= calcestruzzo armato; C.A.P.= calcestruzzo precompresso

Per quanto riguarda il rapporto $(a/c)_2$ determinato dalla durabilità, esso risulta 0,50 (Tabella 6) e quindi maggiore di quello (0,42) determinato dalla R_{ck} come risulta dalla figura 2.

CONCLUSIONI

Le Norme Europee [1] contribuiscono in modo significativo al progresso della tecnologia del calcestruzzo in termini di lavorabilità dell'impasto fresco, di resistenza meccanica del calcestruzzo indurito, e di durabilità delle strutture esposte agli agenti aggressivi ambientali. Secondo le Norme Europee, queste tre proprietà sono rispettivamente espresse come "**classe di consistenza**", "**classe di resistenza**" e "**classe di esposizione**". Sulla base di queste norme è possibile prescrivere le prestazioni di capitolato, emesse dal progettista nei confronti del produttore di calcestruzzo e dell'impresa che lo mette in opera, per costruzioni in C.A. o C.A.P. a durabilità programmata.

Tra i vari requisiti che determinano il rapporto acqua/cemento –ed in particolare la "classe di resistenza" e la "classe di esposizione"– si deve adottare il valore più basso del rapporto acqua/cemento affinché entrambi i requisiti siano soddisfatti.

L'Eurocodice 2 [2] specifica il minimo spessore di copriferro per proteggere i ferri di armature dalla corrosione provocata dall'anidride carbonica o dai sali a base di cloruro. Lo spessore di copriferro dipende dalla classe di esposizione, dal tipo di struttura del calcestruzzo (in CA oppure in CAP), e dalla richiesta di durabilità programmata in termini di vita utile di servizio di almeno 50 oppure 100 anni.

Infine, è necessario che una persona qualificata agisca da Direttore dei lavori per verificare:

- se le proprietà del calcestruzzo fornito siano in accordo con le prescrizione del progettista per quanto concerne la "**classe di consistenza**" e la "**classe di resistenza**";

- se la costruzione eseguita dall'impresa soddisfa i requisiti prescritti dal progettista circa i distanziatori per garantire uno spessore minimo di copriferro per le strutture in C.A. o C.A.P. emanate dal progettista in funzione della "**classe di esposizione**" e della durabilità programmata;
- s e compatta a rifiuto il calcestruzzo fresco;
- se esegue la richiesta stagionatura umida delle superfici del calcestruzzo dopo la rimozione delle casseforme.

BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] EN 206-1, "Concrete–Specification, performance, production and conformity", December, 2015.
- [2] Eurocode 2," *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2015.
- [3] L. Bertolini, Structural, Giugno 2014, paper 16.
- [4] F. Lollini, Structural, Novembre/Dicembre 2021, paper 19.
- [5] Tabella 2.4.1 delle Norme Tecniche delle Costruzioni emanate dal Ministero con Decreto del 2017.
- [6] M. Collepari, S. Collepari, R. Troli "*Il Nuovo Calcestruzzo*", Sesta Edizione, pg.139, Tintoretto Editore, 2014.
- [7] I. Lyse, "*Proceedings A.S.T.M. 32, Part 2*", pp. 439", 1932.
- [8] M. Collepari, S. Collepari, R. Troli., R. Troli, "*Il Nuovo Calcestruzzo*", Sesta Edizione, pg. 142, Tintoretto Editore, 2014.