

IL COPRIFERRO PER LE STRUTTURE IN C.A. ALLA LUCE DELLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (D.M. 14.01.2008) *

Alessandra BUOSO **, Luigi COPPOLA ***

* *Articolo già pubblicato nella rivista "L'Edilizia – Building and Construction for Engineers", N. 155 / 2008*

** *Ingegnere Civile Strutture; Dottorato di Ricerca in "Studio di calcestruzzi rinforzati con nanotubi in carbonio"; Ricercatrice presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bergamo*

*** *Professore Associato di "Materiali per l'Edilizia" e di "Materiali per il Restauro delle Strutture" e già Direttore del "Laboratorio Prove Materiali e Strutture", Facoltà di Ingegneria, Università di Bergamo; Docente di "Tecnologia dei Materiali", University of Applied Sciences di Lugano (Svizzera)*

INTRODUZIONE

Molte volte ci siamo chiesti se esista per un determinato elemento strutturale un solo copriferro oppure se di fatto ne esistano due. A questo termine, infatti, non tutti attribuiscono lo stesso significato:

- *il calcolatore strutturale identifica come copriferro, ad esempio in una trave, la distanza tra il baricentro dell'armatura disposta per assorbire la caratteristica flettente e la superficie esterna dell'elemento strutturale;*
- *la normativa vigente ed, in particolare, le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14.01.2008), in accordo all'Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1), definisce, invece, il copriferro come la distanza tra la superficie esterna dell'armatura (inclusi staffe, collegamenti e rinforzi superficiali, se presenti) più prossima alla superficie del calcestruzzo e la superficie stessa del calcestruzzo. Il copriferro, in accordo alle Norme Tecniche, quindi, individua lo spessore di calcestruzzo che ricopre l'armatura più esterna.*

Si intuisce da quanto sopra riportato come il diverso significato attribuito al termine "copriferro" possa generare non poca confusione. Si pensi, ad esempio, ad una trave emergente la cui armatura all'intradosso della sezione di mezzera sia costituita da ferri $\Phi 16$ e staffe $\Phi 8$ con uno spessore netto di ricoprimento di calcestruzzo di 10 mm. In accordo con le Norme Tecniche, quindi, il copriferro è di 10 mm. Per il calcolatore strutturale, invece, il copriferro vale circa 25 mm (spessore di calcestruzzo: 10 mm + diametro della staffa: 8 mm + raggio dell'armatura principale: 8 mm = 26 mm). Negli elaborati progettuali di questo elemento inflesso verrà riportato nella quasi totalità dei casi come valore del copriferro, erroneamente, 25 mm quando, in realtà, il copriferro effettivo, in accordo alle Norme Tecniche, risulta di appena 10 mm. La situazione ipotizzata, presenta non pochi problemi, non tanto dal punto di vista del calcolo strutturale - il quale, come ben noto, si basa proprio sul valore della distanza del baricentro dell'armatura principale dalla superficie esterna dell'elemento in calcestruzzo necessaria ai fini dell'individuazione del braccio della coppia interna e, quindi, del momento resistente - quanto ai fini della corretta trasmissione degli sforzi tra acciaio e calcestruzzo, della prevenzione dell'acciaio dalla corrosione promossa dagli agenti aggressivi ambientali (anidride carbonica e cloruri) e della protezione dell'acciaio dall'incendio.

L'errore di confondere la distanza del baricentro dell'armatura principale dalla superficie esterna dell'elemento con il copriferro conduce ad un sottodimensionamento del copriferro effettivo che può riflettersi, quindi, in un limitato sviluppo delle tensioni di aderenza acciaio-calcestruzzo, in una precoce corrosione delle barre soprattutto negli elementi esposti all'esterno (in particolar modo quelli esposti all'azione dell'acqua di mare, ai sali disgelanti a base di cloruro o all'azione dell'anidride carbonica atmosferica) e, infine, in un elevato rischio di collasso delle barre in occasione di eventi accidentali quali l'incendio.

Il presente articolo, quindi, vuole fornire un contributo pratico per un corretto dimensionamento del copriferro ove a questo termine si attribuisce il significato stabilito dalle Norme Tecniche (D.M. 14.01.2008). Queste ultime al punto 4.1.6.1.3 ("Copriferro e interferro") indicano che "L'armatura resistente deve essere protetta da un adeguato ricoprimento di calcestruzzo" senza fissarne un limite inferiore (una volta di 20mm in accordo al D.M. 9.01.96 e a quello del 23.09.2005). Le Norme Tecniche, inoltre, stabiliscono che il valore minimo del copriferro deve essere individuato sulla base delle seguenti considerazioni:

- *la verifica allo stato limite di fessurazione secondo il § 4.1.2.4 NTC;*
- *un sufficiente sviluppo delle tensioni di aderenza acciaio/calcestruzzo (vedi Eurocodice 2 – parte 1);*
- *la protezione delle armature dalla corrosione (vedi Eurocodice 2 – parte 1);*
- *la resistenza al fuoco della struttura (vedi Eurocodice 2 – parte 2).*

Di seguito, quindi, viene presentato l'iter progettuale che conduce alla scelta del valore minimo di copriferro in accordo ai dettami sopra menzionati richiesti dalle Norme Tecniche.

Per quanto concerne la sola verifica agli stati limite di esercizio, per la limitazione della fessurazione, essendo essa strettamente correlata al dimensionamento strutturale, non sarà trattata direttamente nel presente articolo. Questa verifica, infatti, dipende dal dimensionamento dello specifico elemento strutturale in c.a. o c.a.p. e, quindi, non può essere ricondotto, in questa sede, ad una trattazione di tipo generalista.

Prima di procedere nella presentazione della metodologia di valutazione del copriferro ci preme sottolineare come un suo corretto dimensionamento possa consentire, unitamente ad una attenta calcolazione strutturale e alla scelta di un calcestruzzo durevole, di raggiungere un maggior livello di protezione delle strutture nei confronti del fuoco e delle azioni aggressive ambientali con inevitabili ricadute positive sia sulla sicurezza strutturale dell'opera che sulla riduzione dei costi di manutenzione prevenendo i fenomeni di degrado tipici di strutture con copriferri modesti. Queste considerazioni evidenziano ancora una volta come centrale risulti il ruolo del progettista calcolatore strutturale nel definire un adeguato spessore di copriferro, dell'impresa nel rispettarlo con l'adozione di opportuni distanziatori e della Direzione Lavori e del Collaudatore in corso d'opera cui si demanda il compito di controllare che lo spessore definito dal progettista/calcolatore sia stato rispettato dall'impresa esecutrice.

COPRIFERRO MINIMO, COPRIFERRO NOMINALE E TOLLERANZA DI ESECUZIONE

In accordo con l'Eurocodice 2, il copriferro da utilizzare nei calcoli strutturali e da riportare negli elaborati grafici si definisce come *copriferro nominale* (c_{NOM}) dato da:

$$c_{NOM} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

dove:

- c_{min} = valore del copriferro minimo
- Δc_{dev} = tolleranza di esecuzione relativa al copriferro

Lo spessore minimo del copriferro sarà il valore massimo tra quelli minimi imposti per soddisfare le esigenze di durabilità, di aderenza e di resistenza al fuoco (Figura 1), secondo la relazione:

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; c_{min,f}; 10\text{mm})$$

dove:

- $c_{min,b}$ = copriferro minimo necessario per l'aderenza delle armature
- $c_{min,dur}$ = copriferro minimo necessario per la durabilità dell'opera
- $\Delta c_{dur,\gamma}$ = valore aggiuntivo del copriferro legato alla sicurezza
- $\Delta c_{dur,st}$ = riduzione del copriferro quando si utilizza acciaio inossidabile
- $\Delta c_{dur,add}$ = riduzione del copriferro minimo quando si ricorre a protezioni aggiuntive
- $c_{min,f}$ = copriferro minimo necessario per la resistenza al fuoco dell'opera



Figura 1 – Il ruolo del copriferro

1. COPRIFERRO MINIMO PER GARANTIRE L'ADERENZA ACCIAIO/CALCESTRUZZO ($c_{min,b}$)

Relativamente allo spessore minimo per garantire una corretta trasmissione degli sforzi tra armatura e calcestruzzo ($c_{min,b}$) si farà riferimento al diametro delle barre ordinarie, a quello delle guaine (nelle strutture post-tese) e a quello dei trefoli o dei fili nelle strutture pre-tese secondo quanto riportato in Tabella 1. Da sottolineare che per armature ordinarie, sia in barre singole che raggruppate, immerse in un calcestruzzo avente diametro massimo dell'aggregato maggiore di 32 mm (in accordo alla serie normalizzata + serie 1, aggregati aventi diametro massimo di 40 oppure 63 mm), il valore minimo del copriferro da imporre per garantire una corretta aderenza tra barre e conglomerato sarà pari al diametro delle barre aumentato di 5 mm.

TIPO DI ARMATURA		COPRIFERRO $c_{min,b}$
ARMATURA ORDINARIA	Barre singole	Diametro della barra
	Barre raggruppate	Diametro equivalente
	Se $D_{max} > 32$ mm il valore precedente deve essere incrementato 5mm	
ARMATURE DA PRECOMPRESSIONE POST-TESE	Guaine a sezione circolare	Diametro
	Guaine a sezione rettangolare	Dimensione più piccola o la metà della dimensione più grande se questa è superiore
ARMATURE DA PRECOMPRESSIONE PRE-TESE	Trefoli o fili lisci nei solai	1.5 * Diametro
	Trefoli o fili lisci	2 * Diametro
	Fili indentati	3 * Diametro

Tabella 1 – Calcolo del copriferro minimo atto a garantire una corretta trasmissione degli sforzi tra armatura e calcestruzzo ($c_{min,b}$) in funzione del tipo di armatura

2. COPRIFERRO MINIMO PER GARANTIRE DURABILITÀ ($c_{min,dur}$)

Il copriferro riveste un ruolo di primaria importanza in quei contesti in cui il degrado prevalente è rappresentato dalla corrosione dei ferri di armatura. L'adozione di un copriferro sufficientemente spesso, infatti, consente di allungare il cammino che le sostanze depassivanti (anidride carbonica e cloruri) debbono percorrere per raggiungere l'armatura. Pertanto, più grande risulterà lo spessore maggiore sarà il tempo di innesco del processo di corrosione dell'acciaio e, conseguentemente, la struttura avrà una vita nominale più prolungata.

A tal proposito, in accordo alle NTC, paragrafo 2.4, il progettista deve dichiarare nei documenti progettuali *la vita nominale* da assegnare alla struttura in funzione della sua importanza e della classe d'uso; si ricorda che *per opere ordinarie la vita nominale è di 50 anni*.

Nello specifico, per quanto attiene alla scelta del copriferro minimo per il rispetto delle condizioni di durabilità, ($c_{min,dur}$), l'Eurocodice 2 (UNI EN 1992-1-1) fornisce, in forma tabellare i valori del copriferro minimo in funzione del tipo di armatura (lenta o da precompressione), della *classificazione strutturale* e delle classi di esposizione ambientale cui l'elemento in calcestruzzo ricade (Tabella 2). Nel draft dell'Appendice nazionale dell'Eurocodice 2 si stabilisce che *le costruzioni, con vita nominale di 50 anni, ricadano in classe strutturale S4 e, pertanto, i valori minimi del copriferro sia per c.a. che c.a.p., possono essere dedotti direttamente dalla Tabella 2 alla riga corrispondente a tale classe strutturale (S4) in funzione della classe di esposizione ambientale (X0, XC, XD e XS)*.

CLASSE STRUTTURALE	CLASSE DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE SECONDO UNI 11104						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10 (10)	10(15)	10(20)	15(25)	20(30)	25(35)	30(40)
S2	10 (10)	10(15)	15(25)	20(30)	25(35)	30(40)	35(45)
S3	10 (10)	10(20)	20(30)	25(35)	30(40)	35(45)	40(50)
S4	10 (10)	15(25)	25(35)	30(40)	35(45)	40(50)	45(55)
S5	15 (15)	20(30)	30(40)	35(45)	40(50)	45(55)	50(60)
S6	20 (20)	25(35)	35(45)	40(50)	45(55)	50(60)	55(65)

Tabella 2 – Valori minimi del copriferro ($c_{min,dur}$) atti a garantire la durabilità in funzione della classe di esposizione ambientale e della classe strutturale dell'opera (i valori tra parentesi sono relativi alle opere in c.a.p.)

I valori minimi del copriferro riportati in Tabella 2 debbono essere opportunamente modificati se:

- si prevede un incremento della vita nominale di progetto;
- si utilizza calcestruzzo con una classe di resistenza superiore rispetto a quella minima imposta dai prospetti della durabilità riportati nella UNI 11104;
- l'elemento da realizzare ha una forma particolare;
- si esercitano controlli di qualità speciali sulle forniture di calcestruzzo.

In queste situazioni, partendo dalla classe strutturale S4, si procederà in accordo al prospetto riportato in Tabella 3 ad aumentare o diminuire la classe strutturale secondo le specifiche esigenze che di volta in volta si presenteranno durante l'iter progettuale.

Ad esempio, se per gli elementi interni in classe di esposizione XC1, per garantire i requisiti strutturali, si debba prescrivere un calcestruzzo in classe di resistenza C32/40, maggiore di quella minima (C25/30) prevista per garantire la durabilità in questa classe di esposizione, sarà possibile ridurre gli elementi che si stanno dimensionando di una classe strutturale, che verranno classificati S3 in luogo di S4. Pertanto, per questi elementi (classe strutturale S3) il copriferro minimo potrà essere ridotto da 15 mm a 10 mm.

CRITERIO	CLASSE DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE SECONDO UNI 11104						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
VITA UTILE DI PROGETTO DI 100 ANNI	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi	Aumentare di 2 classi
CLASSE DI RESISTENZA	≥ C30/37 Ridurre di 1 classe	≥ C30/37 Ridurre di 1 classe	≥ C35/45 Ridurre di 1 classe	≥ C40/50 Ridurre di 1 classe	≥ C40/50 Ridurre di 1 classe	≥ C40/50 Ridurre di 1 classe	≥ C45/55 Ridurre di 1 classe
ELEMENTO DI FORMA SIMILE AD UNA SOLETTA (posizione delle armature non influenzata dal processo costruttivo)	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe
È ASSICURATO UN CONTROLLO DI QUALITÀ SPECIALE DELLA PRODUZIONE DEL CALCESTRUZZO	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe	Ridurre di 1 classe

Tabella 3 – Classificazione strutturale in accordo UNI EN 1992-1-1

Quando, invece, la vita nominale da garantire per l'opera ha una durata superiore a 50 anni ed, in particolare pari a 100 anni, è necessario intervenire aumentando gli spessori di copriferro previsti, a parità di tutte le condizioni per le opere con vita nominale di 50 anni. L'aumento della vita nominale, infatti, comporta delle variazioni sostanziali sulla dimensione del copriferro per le classi di esposizione XC, XD ed XS, laddove il calcestruzzo svolge un ruolo preventivo della corrosione dei ferri di armatura. Nel caso, invece, di strutture esposte alle classi XF1/XF3 (azione dei cicli di gelo-disgelo in assenza di sali disgelanti) ed XA (strutture interrate o idrauliche a contatto con terreni e acque aggressive), dove l'aggressione ambientale si rivolge esclusivamente nei confronti della matrice cementizia, aumentare lo spessore del copriferro non ha alcun beneficio sulla vita nominale della struttura. In questi casi risulta, invece, necessario ricorrere ad un calcestruzzo con una maggiore classe di resistenza caratteristica (quindi, con un minore rapporto a/c) in grado di ostacolare la penetrazione della sostanza aggressiva o prevedere l'utilizzo di un rivestimento protettivo superficiale di natura epossidica, poliuretanic o a base di malte polimero-cemento.

Nel caso di strutture aeree (classe di esposizione XC), marine (XS) o soggette al trattamento con sali disgelanti a base di cloruro (XF2 e XF4 che conseguentemente ricadono anche nella classe di esposizione XD) alle quali viene assegnata una vita nominale maggiore di 50 anni, è necessario, quindi, procedere al calcolo del copriferro che si sviluppa, da una parte secondo l'Eurocodice 2 (Tabella 2 e 3) e, dall'altra, calcolando direttamente gli spessori minimi da garantire a protezione delle armature per l'intera vita nominale dell'opera desunti, come meglio verrà specificato nel seguito, dalle leggi di diffusione delle sostanze aggressive nel calcestruzzo (CO₂ + Cl⁻). Occorrerà, quindi, confrontare tra i valori ottenuti del copriferro quello più stringente (cioè quello di maggiore spessore) che costituirà il copriferro minimo per la durabilità (C_{min,dur}) da assegnare all'opera. Nel paragrafo che segue viene illustrata in dettaglio la procedura per l'individuazione di C_{min,dur} per strutture con vita nominale maggiore di 50 anni.

2.1 Calcolo del copriferro per strutture con vita nominale di 100 anni mediante Eurocodice 2

Il calcolo del copriferro in accordo con la procedura definita dall'Eurocodice 2 è valido solo nel caso in cui la vita nominale assegnata alla struttura sia pari a 100 anni. Per vite nominali maggiori lo spessore minimo del copriferro per garantire la durabilità deve necessariamente essere condotto con le procedure descritte nei due paragrafi che seguono basate sulle leggi di diffusione dell'anidride carbonica e del cloruro nel calcestruzzo.

Come già menzionato, in accordo con l'Eurocodice 2, un'opera con vita nominale di 50 anni ricade in classe strutturale S4. Lo stesso Eurocodice stabilisce che se la vita nominale è di 100 anni occorre aumentare la classe strutturale di 2 (Tabella 3). Pertanto, in via del tutto generale una struttura con vita nominale di 100 anni ricade in classe strutturale S6 (S4 + 2). Nota la classe strutturale sarà, quindi, di facile individuazione lo spessore minimo del copriferro consultando la Tabella 2 una volta nota la classe di esposizione ambientale in cui l'elemento strutturale ricade.

Ad esempio, nel caso delle pile di un viadotto, situato in una zona a clima temperato, ricadente nella classe di esposizione XC4, realizzato con un calcestruzzo di resistenza caratteristica pari a 40 N/mm², il copriferro per la durabilità sarà pari a 30 mm e 40 mm rispettivamente se per l'opera è prevista una vita nominale di 50 e 100 anni. In sostanza, come si può notare dalla consultazione della Tabella 2, l'incremento della vita nominale di un'opera da 50 a 100 anni comporta, in accordo all'Eurocodice 2, a pari R_{ck} del calcestruzzo, un aumento dello spessore minimo del copriferro di 10 mm indipendentemente dalla classe di esposizione ambientale in cui la stessa ricade. Come si può notare, dalla consultazione delle Tabelle 2 e 3, inoltre, al fine di ridurre lo spessore minimo del copriferro può essere opportuno ricorrere all'impiego di un calcestruzzo di classe di resistenza caratteristica più elevata (Tabella 3) riducendo la classe strutturale da S6 a S5 con una diminuzione dello spessore di copriferro di 5 mm.

Il valore del copriferro ottenuto con la procedura definita dall'Eurocodice 2 deve essere confrontato con gli spessori di copriferro determinati mediante le leggi di diffusione del cloruro e dell'anidride carbonica che vengono discusse nei due paragrafi che seguono. Al solito, il valore definitivo che verrà adottato per il copriferro minimo sarà il maggiore tra quelli individuati con la procedura definita dall'Eurocodice 2 e quelli stabiliti con le leggi di diffusione delle sostanze aggressive (anidride carbonica e cloruri).

Le leggi di diffusione delle sostanze depassivanti dell'acciaio (anidride carbonica e cloruri) nel calcestruzzo si presentano più flessibili rispetto al metodo proposto dall'Eurocodice 2 utilizzabile solo per vite nominali pari a 100 anni. Le procedure che si basano sull'utilizzo delle leggi di diffusione, infatti, possono essere adottate per vite nominali maggiori di 50 anni e diverse da 100 anni. Ad esempio, possono essere utilizzate per strutture di particolare valenza strategica, come il Ponte sullo Stretto di Messina dove si richiede una vita nominale di 200 anni oppure nella progettazione dei depositi di rifiuti nucleari dove la vita nominale richiesta può addirittura risultare di 500 anni.

2.2 Calcolo del copriferro per strutture con vita nominale maggiore di 50 anni esposte al rischio di corrosione promossa dalla carbonatazione (classe di esposizione XC)

L'espressione che correla lo spessore del copriferro c_{fCO_2} di strutture esposte al rischio di corrosione per effetto dell'anidride carbonica con la vita nominale t^* è data da:

$$c_{fCO_2} = 1.4 \cdot K_{corrCO_2} \cdot \sqrt{t^*}$$

dove:

- c_{fCO_2} è il copriferro minimo (in mm) per strutture esposte all'anidride carbonica
- t^* è vita nominale della struttura (in anni)
- K_{corrCO_2} è la costante di diffusione della CO₂ corretta in base al rischio di corrosione (in mm/anni^{1/2})

Nella Tabella 4 vengono riportati i valori della costante di diffusione della CO₂ (K_{corrCO_2}) (1) per diversi conglomerati maturati a umido per 7 giorni prima dell'esposizione all'anidride carbonica, in funzione delle condizioni ambientali e della resistenza caratteristica a compressione misurata su provini cubici (R_{ck}).

R _{ck} (N/mm ²)	K _{corrCO₂} (mm/anni ^{1/2}) Esterne protette o meno dalla pioggia XC3-XC4	K _{corrCO₂} (mm/anni ^{1/2}) Interne o interrato o permanentemente immerse XC1-XC2
15	6.19	4.13
20	5.42	3.61
25	4.33	2.84
30	3.68	2.32
35	2.97	1.80
40	2.04	1.03
45	1.44	0.85

Tabella 4 – Valori della costante K_{corrCO_2} per calcestruzzi (maturati a umido per 7 giorni) con diverse resistenze meccaniche a compressione esposti in ambienti interni ed esterni

NOTA (1)

La costante K_{corrCO_2} non tiene conto soltanto della velocità di ingresso della CO₂ nel calcestruzzo, ma anche del rischio di corrosione delle barre connesso con la presenza di acqua e di ossigeno. Si fa notare come, la velocità di diffusione della CO₂ per le strutture all'interno risulta maggiore di quella delle strutture esposte all'esterno. Tuttavia, gli elementi in c.a. che si trovano all'interno di un fabbricato, per via dell'elevata resistività derivante dal copriferro asciutto, sono quelli

esposte ad un rischio praticamente nullo di corrosione. Questo spiega il perché il coefficiente $K_{corr_{CO_2}}$ per le strutture esterne sia maggiore di quelle interne anche se nella realtà la carbonatazione procede con una maggiore velocità nelle strutture asciutte all'interno di un fabbricato. L'introduzione di questo coefficiente $K_{corr_{CO_2}}$, in luogo della semplice costante di diffusione della CO_2 che tiene conto solo della velocità di ingresso dell'anidride carbonica, si rende, in sostanza, necessaria al fine di evitare una sovrastima del copriferro per gli elementi interni pochi esposti al rischio di corrosione (ma fortemente carbonatati) e, per contro, una sottostima del copriferro per le strutture esterne fortemente esposte al rischio di corrosione, ma poco carbonatate.

L'espressione sopra riportata può essere utilizzata per il calcolo dello spessore minimo del copriferro una volta nota la resistenza caratteristica (e , quindi, la costante $K_{corr_{CO_2}}$) imponendo t^* pari alla vita nominale prefissata per la struttura. Risolvendo, quindi, l'equazione rispetto a cf_{CO_2} si ottiene lo spessore minimo del copriferro.

Per una maggiore comprensione di quanto sopra espresso si faccia riferimento al viadotto situato in clima temperato di cui al precedente paragrafo di valenza strategica e per il quale si vuole garantire una vita nominale di 100 anni. Si tratta di un'opera che ricade nella classe di esposizione XC4 per la quale si prevede di utilizzare un calcestruzzo con resistenza caratteristica di 40 N/mm^2 conforme a quella minima indicata per la durabilità dalla norma UNI 11104. Per il coefficiente $K_{corr_{CO_2}}$, si adotta il valore desunto dalla Tabella 4 per le strutture esposte all'esterno ($K_{corr_{CO_2}} = 2.04$). Fissato il tempo t^* pari alla vita nominale dell'opera (100 anni) si ha:

$$cf_{CO_2} = 1.4 \cdot K_{corr_{CO_2}} \cdot (t^*)^{1/2} = 1.4 \cdot 2.04 \cdot (100)^{1/2} = 1.4 \cdot 20.4 \text{ mm}$$

$$cf_{CO_2} = 28.6 \text{ mm} \approx 30 \text{ mm}$$

Il valore ottenuto va confrontato con quello desunto dall'Eurocodice 2. Per la struttura in esame dal paragrafo precedente era emerso un copriferro minimo di 40 mm. Pertanto, si può concludere che per le pile del viadotto in esame il copriferro minimo per la durabilità ($c_{min,dur}$) sarà quello maggiore desunto dalla procedura suggerita dall'Eurocodice 2 e pari a 40 mm.

2.3 Calcolo del copriferro per strutture con vita nominale maggiore di 50 anni esposte al rischio di corrosione promossa dai cloruri (classe di esposizione XD e XS).

L'espressione che correla lo spessore del copriferro di strutture esposte al rischio di corrosione da cloruri cf_{Cl} con la vita nominale t^* è data da:

$$cf_{Cl} = \text{copriferro minimo} = 1206 \cdot (9.46 \times 10^7 \cdot t^* \cdot D_{app})^{1/2} + dx$$

dove :

- t^* = è la vita nominale della struttura (in anni)
- D_{app} = coefficiente di diffusione apparente del cloruro nel calcestruzzo (m^2/s)
- dx = strato di convezione (mm)

C(x/y)	D_{app} (m^2/s)
C16/20	$10.0 \cdot 10^{-12}$
C20/25	$5.0 \cdot 10^{-12}$
C25/30	$3.5 \cdot 10^{-12}$
C28/35C30/37	$2.0 \cdot 10^{-12}$
C32/40	$1.0 \cdot 10^{-12}$
C35/45	$0.5 \cdot 10^{-12}$
C40/50	$0.3 \cdot 10^{-12}$

Tabella 5 – Coefficiente di diffusione apparente del cloruro in calcestruzzi confezionati con cemento Portland di tipo I

Il valore del coefficiente di diffusione apparente (D_{app}) di calcestruzzi confezionati con cemento Portland è riportato in Tabella 5. Per calcestruzzi confezionati con cementi diversi da quelli Portland (tipo I) il coefficiente di diffusione deve essere opportunamente corretto moltiplicandolo per il coefficiente riportato in Tabella 6 in funzione del tipo di cemento utilizzato. Come si può notare, ai fini della diminuzione dello spessore del copriferro i cementi pozzolanici (tipo IV) e d'altoforno (tipo III) sono da privilegiarsi in luogo di quelli portland o portland al calcare. La riduzione del copriferro conseguente all'impiego dei cementi tipo III e IV discende dalla capacità dei prodotti di idratazione dei cementi pozzolanici di rallentare la diffusione del cloruro. Per i valori dello spessore dello strato di convezione, infine, si potrà fare riferimento alla Tabella 7.

Tipi di Cemento	I	II -L	II-V	II-S	II-T	IV/A	III/A	III/B	V/A	V/B
Coefficiente correttivo	1.0	1.35	0.85	0.75	0.85	0.60	0.40	0.20	0.45	0.25

Tabella 6 – Coefficiente di correzione di D_{app} per calcestruzzi confezionati con cementi diversi dal tipo I.

Rck	dx (mm)
20-30	10-8
35-45	6-4
50-60	4-2

Tabella 7 – Spessore dello strato di convezione in funzione della resistenza caratteristica del conglomerato misurata su provini cubici

Allo scopo di chiarire in che modo utilizzare la correlazione sopra riportata, si prenda in esame a titolo di esempio una vasca di contenimento di acque contenenti cloruri di un impianto industriale per la quale si prevede una vita nominale di 100 anni. La struttura, realizzata con un calcestruzzo di classe di resistenza 40 N/mm^2 , ricade nella classe di esposizione XC2 (strutture permanentemente immerse) e in quella XD2 (strutture in contatto con acque contenenti cloruri). In accordo con l'Eurocodice 2, gli elementi di questa opera ricadono in classe strutturale S6 e il copriferro minimo è pari a 45 mm (il maggiore tra quello previsto per la classe di esposizione XC2 – 35 mm – e quello richiesto per la classe di esposizione XD2: 45 mm).

Nella ipotesi di confezionare il calcestruzzo con un cemento CEM II A-L 42.5R otteniamo per lo spessore di copriferro:

$$c_{f,Cl} = 1.206 \times (9.46 \times 10^7 \cdot 100 \cdot \text{anni} \cdot 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 1.35)^{1/2} + 5 \text{ mm} = 141 \text{ mm} \approx 14 \text{ cm}$$

Tra i valori calcolati con i due metodi suddetti si sceglierà quello più stringente, ossia il maggiore. Tuttavia, nel caso specifico lo spessore del copriferro maggiore (140 mm) ovviamente risulta improponibile, sia per motivi di carattere tecnico (si pensi alla fessurazione intensa che uno spessore così elevato di calcestruzzo non armato presenterebbe), ma anche di carattere economico. Lo spessore elevato, determinato nel caso in esame, è la diretta conseguenza di una scelta non adeguata del tipo di cemento. Il cemento al calcare, infatti, non si presenta particolarmente adatto per realizzare calcestruzzi destinati a strutture esposte ai cloruri in quanto poco incline a rallentare la diffusione di questi ioni nel calcestruzzo. Indipendentemente da queste considerazioni, è opportuno ricordare come spessori minimi del copriferro maggiori di 50 mm presentano un elevato rischio fessurativo la cui attenuazione è demandata all'impiego di "armature di pelle" realizzate con acciai non sensibili alla corrosione (acciaio inox, zincato). Quando lo spessore minimo del copriferro, quindi, risulta maggiore di 70 mm potrebbe essere necessario ricorrere, al fine di ridurlo entro il limite suggerito:

- all'impiego di un calcestruzzo con una classe di resistenza caratteristica a compressione superiore;
- cambiare tipo di cemento optando per quelli (principalmente pozzolanici e d'altoforno) capaci di rallentare la diffusione del cloruro nel calcestruzzo.

Ad esempio, per la struttura precedentemente analizzata sostituendo il cemento Portland al calcare con un cemento d'altoforno di CEM III/B 42.5R si ha :

$$c_{f,Cl} = 1206 \times (9.46 \times 10^7 \cdot 100 \cdot \text{anni} \cdot 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \cdot 0.20)^{1/2} + 5 \text{ mm} = 57 \text{ mm} \approx 6 \text{ cm}$$

Con questo ultimo cemento, quindi, il copriferro minimo calcolato in base alla legge di diffusione del cloruro (60 mm) risulta più stringente di quello (45 mm) individuato in accordo alla procedura definita dall'Eurocodice 2. Pertanto, adotteremo per la struttura in esame un copriferro minimo ai fini della durabilità ($c_{\min,dur}$) pari a 60 mm.

3. COEFFICIENTI CORRETTIVI PER COPRIFERRO MINIMO DURABILITÀ ($c_{\min,dur}$)

Gli altri valori riportati nell'espressione per il calcolo del copriferro minimo individuano:

- $\Delta C_{dur,\gamma}$ = *margini di sicurezza aggiunto*
Nel draft dell'appendice nazionale dell'Italia, si consiglia di porre tale valore pari a zero.
- $\Delta C_{dur,st}$ = *riduzione del copriferro minimo quando si utilizza acciaio inossidabile*
Nel draft dell'appendice nazionale dell'Italia, si consiglia di porre tale valore pari a zero.
- $\Delta C_{dur,add}$ = *riduzione del copriferro minimo quando si ricorre a protezioni aggiuntive*
Nel draft dell'appendice nazionale dell'Italia, si consiglia di porre tale valore pari a zero.

4. COPRIFERRO MINIMO PER GARANTIRE RESISTENZA AL FUOCO ($c_{\min,f}$)

Nelle Norme Tecniche per le costruzioni al paragrafo 4.1.13 si afferma che "Le verifiche di resistenza al fuoco potranno eseguirsi con riferimento a UNI EN 1992-1-2, utilizzando i coefficienti γ_M (v. § 4.1.4) relativi alle combinazioni eccezionali ed assumendo il coefficiente α_{cc} pari a 1.0". Nella seconda parte dell'Eurocodice 2, infatti, si riportano i criteri di progettazione per strutture resistenti al fuoco. In tale articolo però si vogliono dare degli utili, quanto pratici, riferimenti per il calcolo non dell'intera struttura, ma solo del valore del copriferro minimo per garantire la resistenza al fuoco.

Nel Decreto Ministeriale 09/03/2007 "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco", S.O.G.U. del 29.03.2007 n. 87, nell'Appendice C si afferma che in attesa della pubblicazione delle Appendici Nazionali degli Eurocodici, è possibile limitare l'impiego dei metodi di calcolo alla sola verifica della resistenza al fuoco degli elementi costruttivi portanti in accordo alla norma UNI 9502 "Procedimento

analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso”.

Per semplificare ulteriormente il calcolo, in Appendice A alla suddetta norma UNI si riporta la verifica della capacità portante con il metodo tabellare semplificato. Tale verifica consiste nel determinare la distanza a dell'asse dell'acciaio dalla superficie esposta al fuoco in funzione del tempo di esposizione all'incendio, del tipo di acciaio nonché tenendo conto dei lati della struttura esposti all'azione dell'incendio (Tabella 8). Determinato il valore di a sarà possibile definire lo spessore di copriferro minimo da garantire per la protezione dell'acciaio ricorrendo alla seguente espressione:

$$c_{\min,f} = a - \phi/2$$

dove:

- $c_{\min,f}$ = copriferro minimo per garantire la resistenza al fuoco;
- $\phi/2$ = raggio equivalente dell'armatura principale più esterna alla superficie.

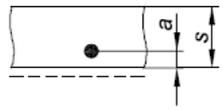
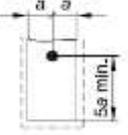
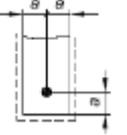
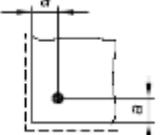
TIPO ACCIAIO	Tempo di esposizione t (min)	Fuoco su un lato 	Fuoco su 2 lati 	Fuoco su 3 lati 	Fuoco sullo spigolo 
ACCIAIO ORDINARIO TIPO 1 (Acciaio teso per travi e solette con possibilità di deformazione ultima in caso di incendio $e_{s,fi} \geq 2\%$)	30	2,00	2,60	3,00	2,05
	60	2,00	4,30	5,00	3,65
	90	2,72	5,60	6,40	4,60
	120	3,40	6,80	7,70	5,80
	180	4,50	8,60	9,80	7,50
	240	5,44	10,20	11,70	9,00
BARRE TIPO 2 (Acciaio compresso nei pilastri o nelle zone compresse di elementi inflessi e acciaio teso per elementi inflessi con deformazione ultima in caso di incendio $e_{s,fi} < 2\%$)	30	2,00	3,15	3,60	2,70
	60	2,73	5,20	5,90	4,50
	90	3,70	6,70	7,60	6,00
	120	4,50	8,00	9,00	7,10
	180	5,84	10,20	11,50	9,10
	240	7,00	12,00	13,60	10,70
ACCIAIO DA PRE-COMPRESSIONE	30	2,00	3,60	4,10	3,20
	60	3,25	5,80	6,50	5,10
	90	4,20	7,30	8,30	6,70
	120	5,20	8,80	9,90	8,00
	180	6,70	11,10	12,50	10,00
	240	8,00	13,00	14,60	11,90

Tabella 8 – Distanze a (cm), dell'asse dell'acciaio dalla superficie esposta al fuoco

Per poter utilizzare correttamente i valori di a riportati nella Tabella 8 è necessario tenere presente le seguenti ipotesi

- i tassi di sollecitazione dell'acciaio nel calcolo a freddo sono i massimi consentiti per il tipo di acciaio cioè $\sigma_{reale} / \sigma_{max} = 1$
- la capacità portante dell'elemento dipende dall'acciaio e non dal conglomerato cementizio
- si considera il conglomerato cementizio privo di acqua interna
- si assume:
 - 1) Fattore di riduzione in caso di incendio delle azioni assunte a temperatura ordinaria $\eta_{fi} = 0,7$
 - 2) Rapporto tra il coefficiente parziale di sicurezza per l'acciaio in caso d'incendio e non $\gamma_{M,fi}/\gamma_M = 1/1.15$ per acciai controllati
 - 3) Fattore di riduzione per la valutazione della resistenza alla temperatura critica
 $k_{crit} = 0.70 \cdot 1/1.15 = 0.60$
 uguagliando k_{crit} con k_{θ} si individuano per i vari tipi di acciaio una temperatura detta temperatura critica.
 $\theta_{s1\ crit.} = 505\text{ °C}$
 $\theta_{s2\ crit.} = 440\text{ °C}$
 $\theta_{b\ crit.} = 400\text{ °C}$
 $\theta_{p\ crit.} = 350\text{ °C}$

I valori di a riportati nella Tabella 8 sono quelli dell'acciaio alla temperatura critica. La verifica che la distanza a per tutte le armature dimensionate con il calcolo a freddo sia uguale o maggiore di quella riportata in Tabella 8 è condizione sufficiente a garantire la capacità portante dell'elemento costruttivo, sempre che si possa escludere una minor capacità per riduzione di resistenza del conglomerato cementizio.

5. Casi particolari per copriferro minimo

Nella scelta del valore del copriferro, inoltre, bisogna tener conto di alcune considerazioni aggiuntive (Tabella 9) nel caso si debba realizzare:

1. Getto su un precedente getto di calcestruzzo
2. Superficie esterna del calcestruzzo irregolare
3. Calcestruzzo soggetto a fenomeni abrasivi

CASI PARTICOLARI	PROVVEDIMENTI
GETTO SU UN ELEMENTO PREESISTENTE IN CALCESTRUZZO	Copriferro in corrispondenza delle due facce = $c_{min,b}$ se 1. Classe di resistenza $\geq C25/30$ 2. Tempo di esposizione all'aria della superficie gettata precedentemente sia ≤ 28 gg 3. Superficie di interfaccia sia resa rugosa
SUPERFICIE ESTERNA DEL CALCESTRUZZO SIA IRREGOLARE	Il valore di c_{min} deve essere incrementato di 5 mm
CALCESTRUZZO SOGGETTO A FENOMENI ABRASIVI	Far attenzione agli aggregati in accordo con UNI EN 206-1 In questo caso è possibile aumentare il copriferro minimo di uno spessore pari a quello che si prevede possa essere asportato a seguito dei fenomeni abrasivi pari a: 1. $k_1 = 5$ mm per abrasione M1 (lieve) 2. $k_2 = 10$ mm per abrasione M2 (notevole) 3. $k_3 = 15$ mm per abrasione M3 (estrema)

Tabella 9 – Prescrizioni aggiuntive nel calcolo del copriferro

6. TOLLERANZA DI ESECUZIONE RELATIVA AL copriferro (Δc_{dev})

Scelto il valore massimo tra i copriferri minimi atti a garantire i requisiti sia di aderenza, durabilità, resistenza al fuoco che di esecuzione, è necessario calcolare i valori della *tolleranza* - Δc_{dev} - per definire il valore del *copriferro nominale* da inserire in capitolato, da riportare negli elaborati grafici e da utilizzare nei calcoli statici. La scelta di Δc_{dev} deve essere effettuata in funzione della severità dei controlli e dei tipi di getti che si realizzano in accordo con quanto definito dall'Eurocodice 2 (Figura 2).



Figura 2 – Indicazioni per la scelta della tolleranza

Si ricorda che il *draft dell'Appendice nazionale Italiana per la norma UNI EN 1992-1-1 consiglia di fissare la tolleranza $\Delta c_{dev} = 10$ mm*, in quanto molto spesso durante l'esecuzione e la messa in opera dei materiali, pur impiegando accorgimenti e controlli, non è possibile garantire un controllo preciso e puntuale del valore del copriferro reale.

7. COPRIFERRO NOMINALE C_{NOM}

A seguito, quindi, delle considerazioni sopra riportate in merito alla durabilità, resistenza al fuoco e trasmissione degli sforzi di aderenza tra acciaio e calcestruzzo, nonché al soddisfacimento della vita nominale imposta per la struttura e tenendo, infine, conto delle tolleranze di esecuzione si potrà procedere alla definizione del copriferro nominale.

È importante ribadire quanto già evidenziato nell'introduzione al presente articolo che il valore del copriferro nominale, in accordo alla definizione data sia dalle NTC (D.M. 14.01.2008) che dagli Eurocodici, rappresenta la porzione netta di calcestruzzo a ricoprimento delle armature sia esse longitudinali che staffe.

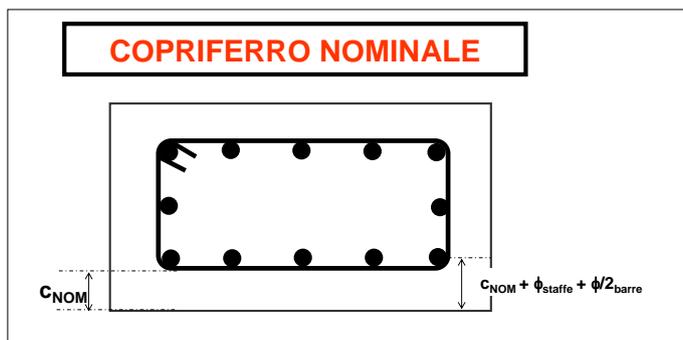


Figura 3 – Differenza tra copriferro nominale C_{NOM} e distanza d ($d = C_{NOM} + \phi_{STAFFE} + \phi/2_{BARRE}$)

Il copriferro nominale, quindi, in nessun caso può essere confuso con la distanza (d) del baricentro dell'armatura principale dalla superficie esterna dell'elemento che viene impiegata nel dimensionamento strutturale degli elementi in c.a. Il valore di d potrà essere opportunamente calcolato a partire dal copriferro nominale cui bisognerà aggiungere il diametro delle staffe e il semidiametro dell'armatura principale resistente (Figura 3):

$$d = C_{NOM} + \phi_{STAFFE} + \phi/2_{BARRE}$$

8. ACCORGIMENTI ULTERIORI :ARMATURA DI PELLE DEL COPRIFERRO

Come ultima notazione relativamente al copriferro val la pena ricordare che quando lo spessore nominale dovesse risultare maggiore o uguale di 60 mm (copriferro minimo 50 mm + 10 mm di tolleranza), al fine di limitare l'ampiezza delle lesioni sempre possibili nel calcestruzzo, è opportuno ricorrere ad una specifica armatura di pelle in forma di rete elettrosaldata soprattutto quando l'armatura secondaria si presenta diradata con passo superiore a 30 cm. Reti elettrosaldate di diametro 6 mm e maglia 15x15 o 20x20 cm preferibilmente in acciaio nero (per elementi strutturali interni, interrati o permanente immersi in acque potabili), in acciaio zincato (per strutture aeree esposte al rischio di corrosione da carbonatazione) o zincato (per strutture soggette all'azione de passivante del cloruro) sono sufficienti allo scopo.

9. ESEMPIO RIASSUNTIVO (1) PER IL CALCOLO DEL COPRIFERRO

Si calcoli il copriferro per una trave di calcestruzzo armato in classe di esposizione XC1 con i seguenti requisiti:

- Calcestruzzo con classe di resistenza C25/30;
- Barre longitudinali inferiori di armatura sono $4\phi 20$; le staffe sono $\phi 8$ con passo di 100 mm;
- Dimensione massima degli aggregati: $D_{max} = 32\text{mm}$;
- Vita nominale di progetto della struttura: 50 anni;
- Controllo in opera del copriferro normale;
- Resistenza al fuoco su un lato per un tempo di esposizione pari a 90 min.

Sono rispettati i requisiti di durabilità in accordo al prospetto 4 della norma UNI 11104 per la classe di esposizione fissata. La classe strutturale dell'elemento in esame è S4.

1. CALCOLO DEL COPRIFERRO DELLE STAFFE	
a.	Copriferro minimo per aderenza (Tabella 1) $C_{min,b}$ = diametro delle barre = 8 mm
b.	Copriferro minimo per durabilità (Tabella 2) $C_{min,dur}$ (classe S4 – esposizione XC1) = 15 mm
c.	Coefficienti correttivi per durabilità (Paragrafo 3) $\Delta C_{dur,\gamma} = 0$ $\Delta C_{dur,st} = 0$ $\Delta C_{dur,add} = 0$
d.	Copriferro minimo per resistenza al fuoco (Tabella 8) a (R90 – fuoco su un lato) = 27.2mm $C_{min,f} = a - \phi/2 = 27.2 - 4 = 23.2$ mm

2. CALCOLO DEL COPRIFERRO DELLE BARRE	
a.	Copriferro minimo per aderenza (Tabella 1) $C_{min,b}$ = diametro delle barre = 20 mm
b.	Copriferro minimo per durabilità (Tabella 2) $C_{min,dur}$ (classe S4 – esposizione XC1) = 15 mm
c.	Coefficienti correttivi per durabilità (Paragrafo 3) $\Delta C_{dur,\gamma} = 0$ $\Delta C_{dur,st} = 0$ $\Delta C_{dur,add} = 0$
d.	Copriferro minimo per resistenza al fuoco (Tabella 8) a (R90 – fuoco su un lato) = 27.2mm $C_{min,f} = a - \phi/2 = 27.2 - 10 = 17.2$ mm

e.	Copriferro minimo (Paragrafo 1) $C_{min} = \max (C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; C_{min,f}; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = \max (8; 15 + 0 - 0 - 0; 23.2; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = 23.2 \text{ mm}$
f.	Tolleranza esecutiva (Paragrafo 6) $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$
g.	Copriferro nominale (Paragrafo 1) $C_{NOM} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 23.2 + 10 = 33 \text{ mm}$

e.	Copriferro minimo (Paragrafo 1) $C_{min} = \max (C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; C_{min,f}; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = \max (20; 15 + 0 - 0 - 0; 17.2; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = 20 \text{ mm}$
f.	Tolleranza esecutiva (Paragrafo 6) $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$
g.	Copriferro nominale (Paragrafo 1) $C_{NOM} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 20 + 10 = 30 \text{ mm}$

Si nota che prevale il valore del copriferro delle staffe, per cui il copriferro delle barre longitudinali sarà:

$$C_{NOM} = 33 \text{ mm}$$

$$C_{NOM,barre} = C_{NOM} + \phi_{staffe} = 33 + 8 = 41 \text{ mm}$$

Il valore da riportare negli elaborate grafici e utilizzare nel calcolo dimensionale, calcolato come somma del copriferro nominale delle barre più raggio dell'armatura longitudinale:

$$d = C_{NOM,barre} + \phi/2_{barre} = 41 + 20/2 = 51 \text{ mm}$$

10. ESEMPIO RIASSUNTIVO (2) PER IL CALCOLO DEL COPRIFERRO

Si calcoli il copriferro per una trave di calcestruzzo armato di un pontile a contatto diretto con acqua di mare in classe di esposizione XC4 – XS3 con i seguenti requisiti:

- Calcestruzzo con classe di resistenza C35/45;
- Cemento CEM III/B 42.5 R;
- Barre longitudinali inferiori di armatura sono 4 ϕ 24; le staffe sono ϕ 8 con passo 100 mm;
- Dimensione massima degli aggregati: $D_{max} = 20 \text{ mm}$;
- Vita nominale di progetto della struttura: 100 anni;
- Controllo in opera del copriferro normale.

Sono rispettati i requisiti di durabilità in accordo al prospetto 4 della norma UNI 11104 per le classi di esposizione fissate.

1. CALCOLO DEL COPRIFERRO DELLE STAFFE	
a.	Copriferro minimo per aderenza (Tabella 1) $C_{min,b} = \text{diametro delle barre} = 8 \text{ mm}$
b.	Copriferro minimo per durabilità (Tabella 2) $C_{min,dur}$ (classe strutturale S4 – esposizione XC4/XS1) = 35mm la vita utile della struttura è fissata a 100 anni esposta all'anidride carbonica e al cloruro marino pertanto : $C_{min,dur}$ (tabella 3 – classe S6) = 55 mm CARBONATAZIONE XC4 $cf_{CO2} = 1.4 K_{corr_{CO2}} * (t^*)^{1/2} = 1.4 * 1.44 * (100)^{1/2} = 20 \text{ mm}$ CLORURI XS3 $cf_{Cl} = 1206 * (9.46 * 10^7 * 100 * 0.5 * 10^{-12} * 0.20)^{1/2} + 4 = 41 \text{ mm}$ pertanto il requisito più stringente è la condizione i. dedotta dalla tabella dell'Eurocodice 2. $C_{min,dur}$ (classe S6 – esposizione XC4/XS1) = 55 mm
c.	Coefficienti correttivi per durabilità (Paragrafo 3) $\Delta C_{dur,\gamma} = 0$ $\Delta C_{dur,st} = 0$ $\Delta C_{dur,add} = 0$
d.	Copriferro minimo (Paragrafo 1) $C_{min} = \max (C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; C_{min,f}; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = \max (8; 55 + 0 - 0 - 0; 0; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = 55 \text{ mm}$
e.	Tolleranza esecutiva (Paragrafo 6) $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$
f.	Copriferro nominale (Paragrafo 1) $C_{NOM} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 55 + 10 = 65 \text{ mm}$

2. CALCOLO DEL COPRIFERRO DELLE BARRE	
g.	Copriferro minimo per aderenza (Tabella 1) $C_{min,b}$ = diametro delle barre = 24 mm
h.	Copriferro minimo per durabilità (Tabella 2) Analoghe considerazioni a quelle sopra riportate $C_{min,dur}$ (classe S6 – esposizione XC4/XS1) = 55 mm
i.	Coefficienti correttivi per durabilità (Paragrafo 3) $\Delta C_{dur,\gamma} = 0$ $\Delta C_{dur,st} = 0$ $\Delta C_{dur,add} = 0$
j.	Copriferro minimo (Paragrafo 1) $C_{min} = \max (C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,\gamma} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; C_{min,f}; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = \max (24; 55 + 0 - 0 - 0; 0; 10 \text{ mm})$ $C_{min} = 55 \text{ mm}$
k.	Tolleranza esecutiva (Paragrafo 6) $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$
l.	Copriferro nominale (Paragrafo 1) $C_{NOM} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 55 + 10 = 65 \text{ mm}$

Si nota che prevale il valore del copriferro delle staffe. Pertanto il copriferro nominale risulta:

$$C_{NOM} = 65 \text{ mm}$$

Il copriferro delle barre longitudinali, invece, risulta:

$$C_{NOM,barre} = C_{NOM} + \phi_{staffe} = 65 + 8 = 73 \text{ mm}$$

Il valore da riportare negli elaborate grafici e utilizzare nel calcolo dimensionale, calcolato come somma del copriferro nominale delle barre più raggio dell'armatura longitudinale:

$$d = C_{NOM,barre} + \phi/2_{barre} = 73 + 24/2 = 85 \text{ mm}$$

Si ricorda che in questo caso, visto che lo spessore nominale è maggiore di 60 mm, al fine di limitare l'ampiezza delle lesioni, è opportuno inserire costituita da una rete elettrosaldata in acciaio inossidabile di diametro 6 mm e maglia 15x 15 cm.

11. BIBLIOGRAFIA

- 1 Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008)
- 2 Eurocodice 2 parte 1 e 2 (UNI EN 1992-1-1 e UNI EN 1992-1-2)
- 3 Draft Appendice Nazionale Eurocodice 2
- 4 UNI-EN 206. Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- 5 UNI 11104. Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1
- 6 D.M.09/03/2007 "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco", S.O.G.U. del 29/03/2007 n. 87
- 7 UNI 9502. Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso
- 8 AICAP – Progetto Ulisse, "Guida all'uso dell'Eurocodice 2", Edizione Pubblicamento, Italia (2006)
- 9 L. Coppola, "Concretum", pp.660, McGraw-Hill, Milano, Italia (2007), ISBN 978-88-386-6465-6
- 10 L. Coppola, "Concrete Tender. Capitolati speciali d'appalto, prescrizioni di capitolato e voci di elenco prezzi per il calcestruzzo destinato a edifici residenziali, commerciali, industriali e ad infrastrutture dell'edilizia civile", pp. 364, Editore Studium Bergomense, Italia (Ottobre 2008), ISBN 978-88-89555-07-1