

## Attività 2.2 – Report sui limiti di utilizzo di armature non tradizionali

Nella seconda fase dell'attività 2 si è proceduto con l'individuazione di quelle che sono le limitazioni delle attuali tecniche progettuali e degli elementi strutturali che vengono poi realizzati in cantiere rispetto ad una progettazione virtuosa che mira a ridurre le emissioni di anidride carbonica e a ridurre lo sfruttamento delle risorse naturali. Di seguito si è studiato il possibile miglioramento dell'attuale stato dell'arte in termini di barre di acciaio di armatura, che attualmente rappresentano "l'anello debole" della durabilità di una struttura in calcestruzzo armato, soprattutto in zone con climi particolarmente freddi e umidi come quelli della regione Alpina. Sulla base dell'elenco delle strategie che si intende perseguire nell'ambito di questo progetto, al fine di minimizzare le emissioni di CO<sub>2</sub>, in questo report si è concentrata l'attenzione sui punti 4. Riduzione del calcestruzzo nelle strutture e, in particolare 5. Impiego di armature non tradizionali.

### 4) Riduzione del calcestruzzo nelle strutture

Secondo la normativa vigente è possibile al giorno d'oggi impiegare calcestruzzi strutturali all'interno di un ampio range di variazione delle resistenze, e per ciascuna si applica un prezzo differente, a seconda della prestazione garantita. Nella pratica professionale, a seguito delle richieste da parte della committenza di limitare i costi delle strutture, è comune impiegare sezioni maggiormente dimensionate ma con calcestruzzi con resistenze più scadenti; inoltre, al fine di evitare di incorrere in calcoli maggiormente complessi si progettano le strutture in campo elastico, senza sfruttarne la duttilità. Il risultato di questi due comportamenti è che vengono impiegate, in molti casi, sezioni trasversali di travi e pilastri molto ampie e con basso contenuto di armatura: ne consegue da un lato un costo inferiore, ma dall'altro un aumento del consumo di materiale e quindi di emissioni di anidride carbonica. Per porre rimedio a questa problematica sarebbe opportuno un intervento da parte dell'Ente Normatore, che imponga una progettazione delle strutture in capacità con dei livelli minimi di duttilità da rispettare e dall'altro che si aumenti la soglia minima di resistenza dei calcestruzzi strutturali, forzando così i progettisti a ottimizzare le dimensioni delle sezioni trasversali degli edifici. Il raggiungimento di resistenze elevate dei calcestruzzi dovrà potersi ottenere tramite miscele altamente sostenibili, e non facendo solo affidamento sul clinker, individuando materiali innovativi e di riciclo che influenzino positivamente le prestazioni del prodotto finito.

Sul territorio nazionale risultano disponibili numerosi materiali di scarto da altri processi produttivi che, se opportunamente aggiunti all'interno del calcestruzzo possono portare resistenze più elevate: anche in questo modo è possibile raggiungere l'obiettivo di ridurre il consumo di risorse e delle emissioni di anidride carbonica. Nel presente progetto si prenderanno in considerazione alcuni di questi materiali, mostrando quale possa essere l'approccio all'impiego di prodotti innovativi per le costruzioni. In particolare risultano degni di nota per la zona del nord-est l'impiego di calcare ottenuto per macinatura della pietra locale (pietra Piasentina) e l'impiego di cenere di lolla di riso (scarto della produzione dell'alimento). Si annovera tra le possibili scelte per impiego nel calcestruzzo la lana di pecora, che, quando non ha mercato (solo la lana di certe specie di pecora si considera utile ai fini tessili), è considerata un materiale di scarto e deve essere smaltita. Un buon modo per riciclarla nel settore delle costruzioni potrebbe essere quello di aggiungerla come fibra nella matrice di calcestruzzo. L'uso di fibre di lana nel calcestruzzo è stato ritenuto possibile, poiché hanno un alto modulo elastico (tra 1 e 4 GPa), che è dello stesso ordine delle fibre generalmente utilizzate nei calcestruzzi fibrorinforzati. Sulla base di diversi studi disponibili in letteratura si è osservato che l'aggiunta di fibre di lana di pecora nel calcestruzzo contrasta la propagazione delle fessure e quindi migliora la sua resistenza a trazione e flessione, e di conseguenza anche la duttilità e la capacità di deformazione.

### 5) Impiego di barre di armatura non tradizionale

La principale causa dell'ammaloramento delle strutture in calcestruzzo è il deterioramento delle barre di armatura: queste infatti sono soggette a corrosione, che può avvenire per effetto

dell'ossidazione, oppure per contatto con ambienti aggressivi chimicamente o esposti alla presenza di cloruri. Il degrado dell'acciaio avviene per via dell'aria che permea all'interno del calcestruzzo fino a raggiungere le barre, che, man mano che, ossidandosi, aumentano di volume, provocando la disgregazione dello strato superficiale di ricoprimento; a questo punto l'acciaio rimane a contatto diretto con l'ambiente circostante, con un conseguente aumento della velocità di corrosione.

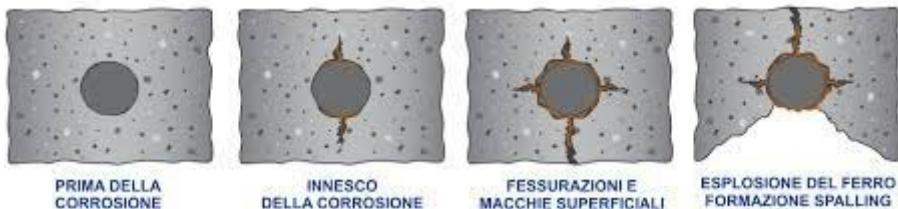


Figura 1 Fasi della corrosione delle barre di armatura

Per garantire una sufficiente durabilità alle strutture in calcestruzzo armato, la normativa attuale impone il rispetto di un coprifero minimo a seconda della classe di esposizione e della vita nominale dell'edificio stesso. In questo modo viene sovradimensionato il ricoprimento delle barre oltre il minimo necessario per l'aderenza, determinando, in molti casi, un non trascurabile aumento dei volumi di materiale necessari per la realizzazione di un fabbricato. Da un punto di vista sismico questo si manifesta come un ulteriore problema, poiché si incrementa la massa dell'edificio e quindi la sua inerzia. Una soluzione che può essere offerta per sopperire a questa problematica è ricorrere a barre di armatura maggiormente resistenti al degrado, realizzate con acciaio zincato e acciaio inossidabile. Si riporta nei seguenti capitoli una breve descrizione del processo di produzione di questi materiali e una sintesi delle loro caratteristiche meccaniche.

### Tipologie di armatura ammesse dalla normativa NTC2018

La normativa italiana NTC 2018, in termini di acciaio da armatura in c.a., impone l'impiego di acciaio del tipo B450C e B450A (capitolo 11.3.2.1), con una resistenza a snervamento di 450 MPa e una tensione a rottura di almeno 540 MPa: qualsiasi sia il trattamento e la tipologia di barra utilizzata, devono essere rispettate queste prestazioni. Per quanto riguarda l'utilizzo di barre in acciaio inox la normativa recita: *“È ammesso l'impiego di acciai inossidabili di natura austenitica o austeno-ferritica, purché le caratteristiche meccaniche siano conformi alle prescrizioni relative agli acciai di cui al § 11.3.2.1”*: pertanto viene concesso l'utilizzo di questo tipo di materiale. Per quanto riguarda l'acciaio zincato la normativa ne consente l'impiego, purché le sue caratteristiche meccaniche siano le stesse di quelle del tipo B450C o B450A. Non vengono fornite ulteriori indicazioni sull'uso di questo materiale, rimandando alle normative UNI EN 10622 e UNI EN ISO 1461 per *“le modalità di controllo del rivestimento di zinco (qualità superficiale, adesione del rivestimento, massa di rivestimento per unità di superficie) e quale utile guida per la scelta dei quantitativi minimi di zinco”*. La normativa NTC2018 non fornisce delle formulazioni per il calcolo del coprifero e della durabilità, ma si limita a rimandare all'Eurocodice per tali valutazioni.

### Acciaio zincato

Ciò che contraddistingue una barra tradizionale in acciaio da una in acciaio zincato è il trattamento superficiale al quale questa viene sottoposta: la zincatura a caldo prevede infatti che il materiale venga immerso in un bagno di zinco fuso (per un intervallo di tempo variabile a seconda dello spessore dello strato che si vuole ottenere). La procedura di zincatura non risulta limitata a questa fase, ma prevede dei trattamenti preliminari al materiale di supporto: è fondamentale che si proceda ad una sgrassatura iniziale tramite un trattamento chimico, quindi si esegue la passivazione, grazie all'applicazione di una soluzione acida che migliora l'adesione dello zinco. A seguito dell'immersione nel bagno di zinco è necessario che il raffreddamento sia rapido, così da evitare lo sgretolamento della pellicola che si è formata. La differenza tra una zincatura e una normale verniciatura sta nella resistenza dello strato rispetto allo strappo e all'abrasione e nella maggiore durabilità.

## Barre di acciaio zincato secondo UNI EN 10622

La normativa europea specifica le prestazioni minime che deve possedere l'acciaio zincato sotto forma di barre di armatura e ne definisce massimi e minimi dello spessore del ricoprimento, oltre che a fornire indicazioni sui controlli da eseguire durante il processo produttivo. In particolare specifica che i parametri meccanici del carico unitario a snervamento, di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2%, della resistenza a trazione e dell'allungamento devono essere superiori dei valori caratteristici definiti per la classe di acciaio della quale fanno parte. Il range di variabilità della massa di zinco che ricopre le barre considera un minimo di 540 g/m<sup>2</sup> per diametri superiori a 5 mm e un massimo di 1070 g/m<sup>2</sup>. Un'ulteriore prescrizione è rappresentata dalla necessità che sia presente uno strato superficiale di zinco puro di almeno 70 g/m<sup>2</sup>. Per garantire la continuità del rivestimento (e quindi la sua accettabilità) è necessario che lo spessore caratteristico sia sempre superiore a 360 g/m<sup>2</sup>; nel caso in cui si formino delle cricche durante la piegatura è prescritto che queste vengano riparate con l'impiego di polvere di zinco.

## Barre in acciaio zincato secondo UNI EN 10348

Pubblicata nel 2024 la normativa UNI EN 10348 presenta contenuti analoghi a quelli della 10622; una differenza che emerge immediatamente è quella del limite inferiore per la massa della zincatura da applicare alle barre: nel caso precedente era pari a 540 g/m<sup>2</sup> per barre con diametro superiore a 5 mm, mentre per il presente caso si pone il limite di 610 g/m<sup>2</sup> per barre con diametro superiore a 6 mm. Si prescrive inoltre un diametro minimo del mandrino di piegatura delle barre in acciaio prima di essere sottoposte a zincatura, in quanto questo processo potrebbe infragilirle.

## UNI EN ISO 1461

La normativa indica quali siano le indagini e i controlli che devono essere eseguiti sui singoli lotti di prodotti zincati per poter essere conferiti in cantiere. In particolare, sulla base del numero totale di barre, si definisce la quantità di elementi dei quali testare la superficie a integrità e spessore del rivestimento. Non sono invece necessarie prove di aderenza dello zinco all'acciaio.

### Dimensioni del campione di controllo correlato alle dimensioni del lotto

Numero di articoli nel lotto	Numero minimo di articoli nel campione di controllo
Da 1 a 3	Tutti
Da 4 a 500	3
Da 501 a 1 200	5
Da 1 201 a 3 200	8
Da 3 201 a 10 000	13
> 10 000	20

## Calcolo del copriferro secondo UNI EN 1992-1-1:2023

L'Eurocodice 2 è la normativa di riferimento per il calcolo del copriferro per gli elementi strutturali in calcestruzzo; al capitolo 6 sviluppa la trattazione riguardante la durabilità, distinguendo due differenti metodi di calcolo del ricoprimento minimo delle armature. Il fenomeno di degrado delle barre infatti non è trascurabile e, considerando una vita nominale di 50 anni, il progettista non può trascurare la durabilità dell'opera. Prima di procedere al dimensionamento delle strutture è fondamentale definire la classe di esposizione del calcestruzzo, scegliendo tra quelle che vengono indicate nella seguente tabella 6.1.

Class	Description of the environment	Informative examples where exposure classes can occur (NDP)
<b>1. No risk of corrosion or attack</b>		
For concrete without reinforcement or embedded metal:		
X0	All exposures except where there is freeze/thaw, abrasion or chemical attack.	Plain concrete members without any reinforcement.
<b>2. Corrosion of embedded metal induced by carbonation</b>		
Where concrete containing steel reinforcement or other embedded metal is exposed to air and moisture, the exposure should be classified as follows:		
XC1	Dry.	Concrete inside buildings with low air humidity, where the corrosion rate will be insignificant.
XC2	Wet or permanent high humidity, rarely dry.	Concrete surfaces subject to long-term water contact or permanently submerged in water or permanently exposed to high humidity; many foundations; water containments (not external). NOTE 1 Leaching could also cause corrosion (see (5), and (6), XA classes).
XC3	Moderate humidity.	Concrete inside buildings with moderate humidity and not permanent high humidity; External concrete sheltered from rain.
XC4	Cyclic wet and dry.	Concrete surfaces subject to cyclic water contact (e.g. external concrete not sheltered from rain as walls and facades).
<b>3. Corrosion of embedded metal induced by chlorides, excluding sea water</b>		
Where concrete containing steel reinforcement or other embedded metal is subject to contact with water containing chlorides, including de-icing salts, from sources other than from sea water, the exposure should be classified as follows:		
XD1	Moderate humidity	Concrete surfaces exposed to airborne chlorides.
XD2	Wet, rarely dry.	Swimming pools; Concrete components exposed to industrial waters containing chlorides. NOTE 2 If the chloride content of the water is sufficiently low then XD1 applies.
XD3	Cyclic wet and dry.	Parts of bridges exposed to water containing chlorides; Concrete roads, pavements and car park slabs in areas where de-icing agents are frequently used.

Class	Description of the environment	Informative examples where exposure classes can occur (NDP)
<b>4. Corrosion of embedded metal induced by chlorides from sea water</b>		
Where concrete containing steel reinforcement or other embedded metal is subject to contact with chlorides from sea water or air carrying salt originating from sea water, the exposure should be classified as follows:		
XS1	Exposed to airborne salt but not in direct contact with sea water.	Structures near to or on the coast.
XS2	Permanently submerged.	Parts of marine structures and structures in seawater.
XS3	Tidal, splash and spray zones.	Parts of marine structures and structures temporarily or permanently directly over sea water.
<b>5. Freeze/Thaw Attack</b>		
Where concrete is exposed to significant attack by freeze/thaw cycles whilst wet, the exposure should be classified as follows. A XF-classification is not necessary in cases where freeze/thaw cycles are rare.		
XF1	Moderate water saturation, without de-icing agent.	Vertical concrete surfaces exposed to rain and freezing.
XF2	Moderate water saturation, with de-icing agent.	Vertical concrete surfaces of road structures exposed to freezing and airborne de-icing agents.
XF3	High water saturation, without de-icing agents.	Horizontal concrete surfaces exposed to rain and freezing.
XF4	High water saturation with de-icing agents or sea water.	Road and bridge decks exposed to de-icing agents and freezing; concrete surfaces exposed to direct spray containing de-icing agents and freezing; splash zone of marine structures exposed to freezing.
<b>6. Chemical attack</b>		
Where concrete is exposed to chemical attack from natural soils and ground water, the exposure should be classified as follows:		
XA1	Slightly aggressive chemical environment.	Natural soils and ground water according to Table 6.2.
XA2	Moderately aggressive chemical environment.	Natural soils and ground water according to Table 6.2.
XA3	Highly aggressive chemical environment.	Natural soils and ground water according to Table 6.2.
<b>7. Mechanical attack of concrete by abrasion</b>		
Where concrete is exposed to mechanical abrasion, the exposure should be classified as follows:		
XM1	Moderate abrasion.	Members of industrial sites frequented by vehicles with pneumatic tyres.
XM2	Heavy abrasion.	Members of industrial sites frequented by fork lifts with pneumatic or solid rubber tyres.
XM3	Extreme abrasion.	Members of industrial sites frequented by fork lifts with elastomer or steel tyres or track vehicles.

Sulla base dell'ambiente in cui è immerso l'edificio si procede quindi al calcolo del coprifero minimo secondo la formulazione:

$$c_{\min} = \max \{c_{\min, \text{dur}} + \sum \Delta c; c_{\min, b}; 10 \text{ mm}\}$$

(1)

In cui:

$c_{min,b}$  è il copriferro minimo per garantire l'aderenza;

$c_{min,dur}$  è il copriferro minimo per la durabilità;

$\Delta c$  sono i coefficienti riduttivi sul copriferro per diverse condizioni in situ (uno dei parametri considerati è l'impiego di particolari protezioni alle barre di acciaio).

Il copriferro minimo per aderenza viene calcolato sulla base del tipo di armatura e di come questa viene disposta:

Steel type	$c_{min,b}^a$
Separated bars	Diameter of bar
Bundled bars	Equivalent diameter $\phi_b$ (see 11.4.3)

<sup>a</sup> Where the specified maximum aggregate size  $D_{upper}$  is > 32 mm, the minimum cover  $c_{min,b}$  should be increased by 5 mm.

In cui il diametro equivalente si può calcolare come:

$$\phi_b = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_s} \quad (2)$$

Per il calcolo del copriferro minimo per la durabilità è invece necessario considerare i due approcci proposti: uno tiene in conto (annesso P) della classe di esposizione, della vita nominale e classe strutturale, l'altro invece considera la classe di esposizione, la vita nominale, la classe strutturale e sulla classe di resistenza a carbonatazione, cloruri e attacchi dal gelo.

Secondo il primo approccio vengono definiti dei valori di copriferro minimo secondo la seguente tabella:

Structural Class	Exposure Class according to Table 6.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Le dimensioni del copriferro (in mm) indicate possono tuttavia essere ridotte se si soddisfano alcuni criteri, come per esempio la classe di resistenza del calcestruzzo, la tipologia di elemento strutturale, la progettazione per vita nominale di 100 anni e l'utilizzo di un controllo speciale nella produzione del calcestruzzo. Si riporta di seguito la tabella P.1 che ne indica i parametri:

Criterion	Exposure Class according to Table 6.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Design Working Life of 100 years	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2
Strength Class <sup>a,b</sup>	≥ C30/37 reduce class by 1	≥ C30/37 reduce class by 1	≥ C35/45 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C45/55 reduce class by 1
Member with slab geometry (position of reinforcement not affected by construction process)	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1
Special Quality Control of the concrete production ensured	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1

<sup>a</sup> The strength class and w/c ratio are considered to be related values. A special composition (type of cement, w/c value, fine fillers) with the intent to produce low permeability may be considered.  
<sup>b</sup> The limit may be reduced by one strength class if air entrainment of more than 4 % is applied.

Una volta che si è definito il coprifero minimo per la durabilità è possibile tenere in considerazione, come descritto precedentemente, ulteriori condizioni favorevoli che portano ad un incremento di durabilità e che consentono di ridurne la dimensione: tuttavia il valore raccomandato è pari a 0 (quindi la normativa trascura eventuali protezioni). Viene affrontato nell'annesso Q della normativa l'impiego dell'acciaio inossidabile, per il quale i valori del coprifero minimo per la durabilità vengono definiti separatamente rispetto a quelli delle armature tradizionale e considerando la seguente classificazione (Tabella Q.2):

Stainless Steel Resistance Class	Pitting Resistance Equivalent PRE <sup>a</sup>	Description	Informative examples EN 10088-1		
			Ferritic	Duplex	Austenitic
SSRC0	0 to 9	Carbon steel reinforcement	—	—	—
SSRC1	10 to 16	Chromium steels	1.4003	—	—
SSRC2	17 to 22	Chromium Nickel steels	—	1.4482	1.4301 1.4307
SSRC3	23 to 30	Chromium Nickel steels with Molybdenum	—	1.4362	1.4401 1.4404 1.4571
SSRC4	≥ 31	Steels with increased content of Chromium and Molybdenum	—	1.4462	1.4529

<sup>a</sup> Calculation of the Pitting Resistance Equivalent:  $PRE = Cr + 3,3 \cdot Mo + n \cdot N$ ; Cr, Mo and N in M.-%.  
 With:  $n = 0$  for ferritic steels,  $n = 16$  for Duplex steels and  $n = 30$  for austenitic steels.  
 The calculation of the Pitting Resistance Equivalent is a useful / practical indication when classifying stainless steels. Other factors can negatively influence the corrosion resistance. The results of the test could be used as input parameters for the service life design.

Si riporta di seguito la tabella Q.3 per la definizione del coprifero da normativa:

Exposure Class	Exposure Resistance Class ERC	Stainless Steel Resistance Class <sup>a</sup>			
		SSRC1	SSRC2	SSRC3	SSRC4
XC1	$\leq$ XRC7	0	0	0	0
XC2		0	0	0	0
XC3	$\leq$ XRC4	0	0	0	0
	$\leq$ XRC7	15	0	0	0
XC4	$\leq$ XRC4	15	0	0	0
	$\leq$ XRC7	20	0	0	0
XD1, XS1	$\leq$ XRDS0,5	10	0	0	0
	$\leq$ XRDS1,5	20	10	0	0
	$\leq$ XRDS3	25	15	10	0
	$\leq$ XRDS6	35	25	15	0
	$\leq$ XRDS10	45	35	25	15
XD2, XD3, XS2, XS3	$\leq$ XRDS0,5	15	10	10	0
	$\leq$ XRDS1,5	25	20	15	0
	$\leq$ XRDS3	35	30	20	10
	$\leq$ XRDS6	50	40	30	20
	$\leq$ XRDS10	65	50	40	30
<p><b>NOTE 1</b> The tabulated cover values apply for a design service life of 50 years unless the National Annex excludes some classes or gives other values.</p> <p><b>NOTE 2</b> For a design service life of 100 years <math>c_{min,dur}</math> in Table Q.3 (NDP) should be increased by +10 mm for all ERC classes unless the National Annex excludes some classes or gives other values.</p> <p><b>NOTE 3</b> In case of combined action of carbonation and chloride induced corrosion, <math>c_{min,dur}</math> in Table Q.3 (NDP) should be increased by 20 mm or a higher stainless steel resistance class should be chosen unless the National Annex gives other values.</p> <p><b>NOTE 4</b> As alternative to the class system of Table Q.3 (NDP) a performance-oriented service life design may be applied if the input parameters out of technical product specifications are available.</p>					
<p><sup>a</sup> For stainless steel corrosion resistance classes see Table Q.2.</p>					

In alternativa all'approccio appena descritto è possibile impiegare il metodo alternativo, che tiene in conto, a seconda del tipo di ambiente nel quale viene inserito il materiale, anche di un ulteriore fattore, cioè la velocità di penetrazione della carbonatazione, dei cloruri e del degrado da cicli di gelo e disgelo all'interno del materiale, producendo l'ammaloramento delle armature. Analogamente al caso precedente, si riporta la tabella 6.3 dell'Eurocodice dalla quale è possibile dedurre il copriferro minimo per la durabilità rispetto all'attacco della carbonatazione:

ERC	Exposure class (carbonation)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Design service life (years)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
<b>XRC 0,5</b>	10	10	10	10	10	10	10	10
<b>XRC 1</b>	10	10	10	10	10	15	10	15
<b>XRC 2</b>	10	15	10	15	15	25	15	25
<b>XRC 3</b>	10	15	15	20	20	30	20	30
<b>XRC 4</b>	10	20	15	25	25	35	25	40
<b>XRC 5</b>	15	25	20	30	25	45	30	45
<b>XRC 6</b>	15	25	25	35	35	55	40	55
<b>XRC 7</b>	15	30	25	40	40	60	45	60

NOTE 1 XRC classes for resistance against corrosion induced by carbonation are derived from the carbonation depth [mm] (characteristic value 90 % fractile) assumed to be obtained after 50 years under reference conditions (400 ppm CO<sub>2</sub> in a constant 65 %-RH environment and at 20 °C). The designation value of XRC has the dimension of a carbonation rate [mm/√(years)].

NOTE 2 The recommended minimum concrete cover values  $c_{min,dur}$  assume execution and curing according to EN 13670 with at least execution class 2 and curing class 2.

NOTE 3 The minimum covers can be increased by an additional safety element  $\Delta c_{dur,y}$  considering special requirements (e.g. more extreme environmental conditions).

Nel caso di calcestruzzo sottoposto all'attacco dei cloruri invece:

ERC	Exposure class (chlorides)											
	XS1		XS2		XS3		XD1		XD2		XD3	
	Design service life (years)						Design service life (years)					
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
<b>XRDS 0,5</b>	20	20	20	30	30	40	20	20	20	30	30	40
<b>XRDS 1</b>	20	25	25	35	35	45	20	25	25	35	35	45
<b>XRDS 1,5</b>	25	30	30	40	40	50	25	30	30	40	40	50
<b>XRDS 2</b>	25	30	35	45	45	55	25	30	35	45	45	55
<b>XRDS 3</b>	30	35	40	50	55	65	30	35	40	50	55	65
<b>XRDS 4</b>	30	40	50	60	60	80	30	40	50	60	60	80
<b>XRDS 5</b>	35	45	60	70	70	—	35	45	60	70	70	—
<b>XRDS 6</b>	40	50	65	80	—	—	40	50	65	80	—	—
<b>XRDS 8</b>	45	55	75	—	—	—	45	55	75	—	—	—
<b>XRDS 10</b>	50	65	80	—	—	—	50	65	80	—	—	—

NOTE 1 XRDS classes for resistance against corrosion induced by chloride ingress are derived from the depth of chlorides penetration [mm] (characteristic value 90 % fractile), corresponding to a reference chlorides concentration (0,6 % by mass of binder (cement + type II additions)), assumed to be obtained after 50 years on a concrete exposed to one-sided penetration of reference seawater (30 g/l NaCl) at 20 °C. The designation value of XRDS has the dimension of a diffusion coefficient [10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s].

NOTE 2 The recommended minimum concrete cover values  $c_{min,dur}$  assume execution and curing according to EN 13670 with at least execution class 2 and curing class 2.

NOTE 3 The minimum covers can be increased by an additional safety element  $\Delta c_{dur,y}$  considering special requirements (e.g. more extreme environmental conditions).

Nella definizione del copriferro minimo è poi possibile una riduzione tramite il coefficiente  $\Delta c$  definito sopra; in particolare le riduzioni sono ammesse principalmente in due situazioni:

- Riduzione del copriferro di 5 mm per elementi la cui armatura non è soggetta a imprecisioni nella posa (solette);
- Riduzione del copriferro di 10 mm nel caso di rivestimento superficiale dell'acciaio (es. zincatura).

Il progettista pertanto, una volta definito il copriferro minimo (Eq.1) con la formulazione definita all'inizio del presente capitolo, deve tenere in considerazione un incremento del ricoprimento per via delle tolleranze di posa; a seconda del tipo di elemento strutturale e del tipo di controllo, scegliendo dalla seguente tabella (6.7), è possibile definire l'aumento da apportare:

	Case	$\Delta c_{dev}$
1	In general: for execution in tolerance class 1 according to EN 13670	10 mm
2	For execution in tolerance class 2 according to EN 13670	5 mm
3	Where fabrication is subjected to a quality assurance system, in which the systematic monitoring includes measurements of the cover	5 mm
4	Where it can be assured that an accurate measurement device is used for systematic monitoring and non conforming members are rejected (e.g. precast elements)	0 mm
5	For concrete members in exposure class XC1, where the risk of corrosion is insignificant	5 mm
6	For concrete cast against surfaces with exposed aggregate (e.g. interfaces)	5 mm
7	For concrete cast against unevenness due to formwork or excavation sheeting (e.g. ribbed finishes or architectural textures)	10 mm + dimension of unevenness
8	Concrete cast against prepared ground (including uneven blinding layer) <sup>a</sup>	40 mm <sup>a</sup>
9	Concrete cast directly against unprepared soil <sup>a</sup>	75 mm <sup>a</sup>
10	Post-installed reinforcing bars	5 mm or according to project specification

<sup>a</sup> These allowances for deviation  $\Delta c_{dev}$  also apply for bored piles and for diaphragm walls designed according to this Eurocode, unless the National Annex gives other special values.

Alla luce di quanto esposto risulta evidente come la normativa vigente prenda in considerazione il contributo alla durabilità delle barre in acciaio inossidabile per l'armatura degli elementi strutturali, consentendo delle forti riduzioni nella scelta del copriferro. Al contrario, il contributo della zincatura delle barre di armatura viene quasi trascurato, consentendo una modesta riduzione del copriferro (10 mm): questo limite risulta fortemente penalizzante per l'impiego di questo prodotto, che, se correttamente trattato, può garantire un'elevata durabilità a parità di prestazioni meccaniche. Sulla base di un'analisi dei prezzi svolta in riferimento alle quotazioni alla data di uscita del presente studio, si analizza la differenza di costo tra questi due prodotti, per definire quale dei due sia maggiormente conveniente. Si è fatto riferimento al prezzario regionale del Friuli Venezia Giulia per l'anno 2024 e si è definito che il prezzo della sola barra in acciaio al kg è di 1,1 euro, mentre nel caso di acciaio zincato il costo del processo di zincatura incide per circa 2 euro per ogni chilo, definendo un costo totale del materiale pari a 3,1 euro per chilo di materiale; nel caso invece di acciaio inossidabile il prezzo di mercato è di circa 7,65 euro per chilo. Risulta eccessivamente costoso l'impiego di

quest'ultima tipologia, mentre, nel caso della zincatura, nell'ottica di allungare poi la vita nominale dell'opera riducendo i costi di manutenzione, si considera più ragionevole l'utilizzo.

Questo ragionamento risulta particolarmente valido nel caso di opere particolarmente esposte ad agenti esterni, come gli ambienti marini: in tal caso un risparmio iniziale sul costo dei materiali può comportare un rapidissimo degrado complessivo dell'opera, che in un periodo di tempo estremamente breve risulta inagibile. Nella seguente figura è fornito un esempio di tale situazione: si può osservare in primo piano ciò che rimane di un'opera realizzata nel 1969 con l'utilizzo di barre in acciaio al carbonio che, a causa dei significativi danni causati dall'ambiente circostante, è stata demolita, rapportata con la struttura in secondo piano realizzata circa trenta anni prima, nel 1940, ma con elementi inossidabili e che, nonostante i 60 anni di vita a contatto con la salinità dell'oceano, non ha mai richiesto interventi su larga scala.



*Figura 2 Confronto tra due infrastrutture in ambiente marino in Messico*

## Un nuovo approccio alla durabilità

Per i prodotti in acciaio sono presenti delle normative europee di riferimento per il calcolo della durabilità del rivestimento in zinco, così da poter valutare lo spessore minimo necessario per poter garantire la vita nominale di un'opera e di conseguenza dei suoi dettagli costruttivi. Non accade lo stesso con le barre di armatura in acciaio zincato per calcestruzzo, il cui beneficio, come esposto precedentemente, viene tenuto in conto in maniera indiretta con una diminuzione forfettaria di 10 mm del coprifero. Si riporta di seguito la formulazione che la normativa europea fornisce per il calcolo del tasso di corrosione del rivestimento in zinco di un elemento strutturale, nell'ottica di applicarlo poi all'acciaio per c.a. Sulla base di analisi sperimentali, come sottolineato dalla normativa vigente UNI EN ISO 14713, l'acciaio zincato nell'impiego come barra di armatura presenta un livello soglia di cloruri più elevato (da 2 a 4 volte). Inoltre lo zinco permette alle barre di avere un pH della passivazione molto maggiore rispetto a quello delle armature tradizionali: esso rimane passivo per un intervallo che va fino a 11,5 (rispetto al 9,5 dell'acciaio nero), rendendo le barre molto meno sensibili al fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo (fenomeno che porta ad un abbassamento del pH). Un ulteriore vantaggio che offre la zincatura è il fatto che, in fase di getto, essa reagisce con il calcestruzzo fresco formando idrossizincato di calcio insolubile: questo prodotto della corrosione diventa uno strato protettivo per lo zinco sottostante, incrementandone la durabilità (purchè il calcestruzzo mantenga un pH inferiore a circa 13,3).



Figura 3 A sinistra una trave con il coprifero completamente rimosso e a destra gli effetti del pitting

La prima considerazione da fare all'avvio della progettazione riguarda la scelta della classe di esposizione del materiale, che, nel caso degli acciai viene definita secondo la normativa UNI EN ISO 9223:2012 (Annex C), dove viene riportata la seguente tabella per rendere più facile l'individuazione dell'ambiente nel quale si inserisce l'elemento metallico (Table C.1):

Corrosivity category <sup>a</sup>	Corrosivity	Typical environments — Examples <sup>b</sup>	
		Indoor	Outdoor
C1	Very low	Heated spaces with low relative humidity and insignificant pollution, e.g. offices, schools, museums	Dry or cold zone, atmospheric environment with very low pollution and time of wetness, e.g. certain deserts, Central Arctic/Antarctica
C2	Low	Unheated spaces with varying temperature and relative humidity. Low frequency of condensation and low pollution, e.g. storage, sport halls	Temperate zone, atmospheric environment with low pollution ( $\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), e.g. rural areas, small towns  Dry or cold zone, atmospheric environment with short time of wetness, e.g. deserts, subarctic areas
C3	Medium	Spaces with moderate frequency of condensation and moderate pollution from production process, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies	Temperate zone, atmospheric environment with medium pollution ( $\text{SO}_2: 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) or some effect of chlorides, e.g. urban areas, coastal areas with low deposition of chlorides  Subtropical and tropical zone, atmosphere with low pollution
C4	High	Spaces with high frequency of condensation and high pollution from production process, e.g. industrial processing plants, swimming pools	Temperate zone, atmospheric environment with high pollution ( $\text{SO}_2: 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) or substantial effect of chlorides, e.g. polluted urban areas, industrial areas, coastal areas without spray of salt water or, exposure to strong effect of de-icing salts  Subtropical and tropical zone, atmosphere with medium pollution
C5	Very high	Spaces with very high frequency of condensation and/or with high pollution from production process, e.g. mines, caverns for industrial purposes, unventilated sheds in subtropical and tropical zones	Temperate and subtropical zone, atmospheric environment with very high pollution ( $\text{SO}_2: 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) and/or significant effect of chlorides, e.g. industrial areas, coastal areas, sheltered positions on coastline

Corrosivity category <sup>a</sup>	Corrosivity	Typical environments — Examples <sup>b</sup>	
		Indoor	Outdoor
CX	Extreme	Spaces with almost permanent condensation or extensive periods of exposure to extreme humidity effects and/or with high pollution from production process, e.g. unventilated sheds in humid tropical zones with penetration of outdoor pollution including airborne chlorides and corrosion-stimulating particulate matter	Subtropical and tropical zone (very high time of wetness), atmospheric environment with very high $\text{SO}_2$ pollution (higher than $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) including accompanying and production factors and/or strong effect of chlorides, e.g. extreme industrial areas, coastal and offshore areas, occasional contact with salt spray
NOTE 1 Deposition of chlorides in coastal areas is strongly dependent on the variables influencing the transport inland of sea salt, such as wind direction, wind velocity, local topography, wind sheltering islands outside the coast, distance of the site from the sea, etc.			
NOTE 2 Extreme effect by chlorides, which is typical of marine splash or heavy salt spray, is outside of the scope of this International Standard.			
NOTE 3 Corrosivity classification of specific service atmospheres, e.g. in chemical industries, is outside of the scope of this International Standard.			
NOTE 4 Surfaces that are sheltered and not rain-washed in marine atmospheric environments where chlorides are deposited and cumulated can experience a higher corrosivity category due to the presence of hygroscopic salts.			
NOTE 5 A detailed description of types of indoor environments within corrosivity categories C1 and C2 is given in ISO 11844-1. Indoor corrosivity categories IC1 to IC5 are defined and classified.			
a In environments with expected "CX category", it is recommended that the atmospheric corrosivity classification from one-year corrosion losses be determined.			
b The concentration of sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) should be determined during at least one year and is expressed as the annual average.			

La corrosione infatti avviene in maniera più veloce per gli ambienti particolarmente aggressivi, mentre, per ambienti protetti e non esposti ad agenti esterni si sviluppa molto più lentamente. La classificazione esposta viene analogamente ripresa nella normativa UNI EN ISO 14713-1, della quale si riporta un estratto:

Categoria di corrosività C Tasso di corrosione per lo zinco (in base a esposizioni di un anno), $r_{\text{corr}}$ in $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ e livello di corrosione	Ambienti tipici (esempi)	
	Interno	Esterno
C1 $r_{\text{corr}} \leq 0,1$ Molto bassa	Ambienti riscaldati con bassa umidità relativa e inquinamento insignificante, per esempio uffici, scuole, musei	Zona secca o fredda, ambiente atmosferico con inquinamento e periodo di umidità molto ridotti, per esempio alcuni deserti, Artico/Antartico centrale
C2 $0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$ Basso	Spazi non riscaldati con temperature e umidità relativa variabili. Bassa frequenza di condensa e ridotto inquinamento, per esempio, magazzini, palestre	Zona temperata, ambiente atmosferico con inquinamento ridotto ( $\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), per esempio aree rurali, piccole città. Zona secca o fredda, ambiente atmosferico con breve periodo di umidità, per esempio deserti, aree subartiche
C3 $0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$ Medio	Spazi con moderata frequenza di condensa e inquinamento moderato dovuto a processi produttivi, per esempio impianti di lavorazione di generi alimentari, lavanderie, fabbriche di birra, caseifici	Zona temperata, ambiente atmosferico con inquinamento medio ( $\text{SO}_2$ : da $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) o un certo effetto di cloruri, per esempio aree urbane, aree costiere con bassa deposizione di cloruri. Zone subtropicali e tropicali con atmosfera con ridotto inquinamento
C4 $2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$ Alto	Spazi con elevata frequenza di condensa ed elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio impianti di lavorazione industriali, piscine	Zona temperata, ambiente atmosferico con elevato inquinamento ( $\text{SO}_2$ : da $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) o notevole effetto di cloruri, per esempio aree urbane inquinate, aree industriali, aree costiere non esposte a nebbia salina, esposizione a forte effetto di sali antighiaccio. Zone subtropicali e tropicali con atmosfera con inquinamento medio

Categoria di corrosività C Tasso di corrosione per lo zinco (in base a esposizioni di un anno), $r_{corr}$ in $\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ e livello di corrosione	Ambienti tipici (esempi)	
	Interno	Esterno
C5 $4,2 < r_{corr} \leq 8,4$ Molto alta	Spazi con elevatissima frequenza di condensa e/o elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio miniere, caverne per scopi industriali, capanne non ventilate in zone subtropicali e tropicali	Zone temperate e subtropicali, ambiente atmosferico con inquinamento molto elevato ( $\text{SO}_2$ : da $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e/o importante effetto di cloruri, per esempio aree industriali, aree costiere, posizioni riparate sulla fascia costiera
CX $8,4 < r_{corr} \leq 25$ Estremo	Spazi con condensa quasi permanente o lunghi periodi di esposizione agli effetti di umidità estrema e/o con elevato inquinamento dovuto a processi produttivi, per esempio capanne non ventilate in zone tropicali umide con penetrazione dell'inquinamento esterno, compresi cloruri dispersi nell'aria e materiale particolato stimolante la corrosione	Zone subtropicali e tropicali (periodo di umidità molto elevato), ambiente atmosferico con inquinamento ( $\text{SO}_2$ ) molto elevato (maggiore di $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), compreso inquinamento dovuto a fattori produttivi e/o forte effetto di cloruri, per esempio aree estremamente industriali, fascia costiera e aree in mare aperto con contatto occasionale con nebbia salina
<p>Nota 1 La deposizione di cloruri nelle aree costiere dipende fortemente dalle variabili che influenzano il trasporto nelle aree interne di sale marino, come la direzione del vento, la velocità del vento, la topografia locale, isole oltre la costa che riparano dal vento, la distanza del luogo dal mare, ecc.</p> <p>Nota 2 La classificazione della corrosività di atmosfera di servizio specifiche, per esempio in industrie chimiche, non rientra nello scopo e campo di applicazione della ISO 9223.</p> <p>Nota 3 Le superfici riparate e non dilavate dalla pioggia, in un ambiente atmosferico marino dove sono depositati cloruri, possono essere di una categoria di corrosività più elevata a causa della presenza di sali igroscopici.</p> <p>Nota 4 Negli ambienti di presunta "categoria CX", si raccomanda di determinare la classificazione della corrosività atmosferica dalle perdite subite in un anno in seguito alla corrosione.</p> <p>Nota 5 La concentrazione di anidride solforosa (<math>\text{SO}_2</math>) dovrebbe essere determinata nel corso di almeno 1 anno ed è espressa come media annuale.</p> <p>Nota 6 Descrizioni dettagliate dei tipi di ambienti interni rientranti nelle categorie di corrosività C1 e C2 sono fornite nella ISO 11844-1. Sono definite e classificate le categorie di corrosività in ambienti interni dalla IC1 alla IC5.</p> <p>Nota 7 Il criterio di classificazione è basato sui metodi di determinazione dei tassi di corrosione di provini normati per la valutazione della corrosività (vedere ISO 9226).</p> <p>Nota 8 I valori di perdita di spessore sono identici a quelli indicati nella ISO 9223.</p> <p>Nota Il materiale di riferimento dello zinco è caratterizzato nella ISO 9226.</p> <p>Nota 10 I tassi di corrosione che superano i limiti superiori nella categoria C5 sono considerati estremi. La categoria di corrosività CX si riferisce ad ambienti specifici marini e marin/industriali.</p> <p>Nota 11 A una prima approssimazione, la corrosione di tutte le superfici metalliche di zinco è dello stesso tasso in un ambiente particolare. Il ferro e l'acciaio generalmente si corrodono da 10 a 40 volte più velocemente dello zinco, i tassi più elevati generalmente si hanno negli ambienti con un'elevata presenza di cloruri. Come riferimento si usano i dati su lamiere piane forniti nelle ISO 9223 e ISO 9224.</p> <p>Nota 12 Con il passare del tempo si verificano cambiamenti negli ambienti atmosferici. Per molte regioni, la concentrazione di agenti inquinanti (particolarmente di <math>\text{SO}_2</math>) nell'atmosfera si è ridotta con il passare del tempo. Questo ha portato a una diminuzione della categoria di corrosività per queste regioni. E per questa ragione i rivestimenti di zinco hanno tassi di corrosione minori rispetto ai dati storici di resistenza alla corrosione. Altre regioni hanno registrato un aumento dell'inquinamento e dell'attività industriale, pertanto si prevede che sviluppino i tipi di ambienti descritti più precisamente da categorie di corrosività più elevate.</p> <p>Nota 13 Il tasso di corrosione per gli strati di zinco e di leghe di zinco-ferro è approssimativamente lo stesso.</p>		

In aggiunta alla 9223 viene fornita una descrizione più precisa delle classi di esposizione, oltre che un range all'interno del quale è possibile collocare il tasso di corrosione del rivestimento in zinco (con tempo di riferimento di 1 anno). Osservando i limiti imposti salta subito all'occhio la sostanziale differenza tra diversi ambienti, che, in percentuale tra una categoria e quella successiva può variare in un range che va dal 200 al 300%. Per ciascuna classe di corrosività, all'interno della normativa, viene indicato il massimo periodo che può intercorrere tra la costruzione e la prima manutenzione:

- Molto breve (VL): da 0 a  $< 2$  anni
- Breve (L): da 2 a  $< 5$  anni
- Media (M): da 5 a  $< 10$  anni
- Elevata (H): da 10 a  $< 20$  anni
- Molto elevata (VH):  $> 20$  anni

Con un corretto svolgimento dei controlli sugli elementi strutturali si può tuttavia garantire un elevata durabilità degli stessi, incrementando la vita utile rispetto a quella di un edificio tradizionale.

Una volta che è stata scelta la corretta classe di esposizione del materiale è possibile procedere al calcolo del tasso di corrosione applicando i relativi coefficienti definiti secondo normativa.

Il calcolo del tasso di corrosione della zincatura al variare del tempo viene svolto in conformità con la normativa europea UNI EN ISO 9224:2012. Le formulazioni proposte per il calcolo sono due e variano a seconda del periodo di tempo che si vuole tenere in considerazione: nel caso di un periodo di esposizione inferiore a 20 anni oppure per vita superiore a tale periodo. Per gli edifici si prende generalmente come riferimento ina vita nominale superiore o uguale a 50 anni e pertanto è necessario riferirsi alla formulazione per esposizioni superiori ai 20 anni. Si riporta di seguito l'espressione da normativa:

$$D(t > 20) = r_{\text{corr}} [20^b + b (20^{b-1}) (t - 20)]$$

(3)

In cui:

$t$  è il tempo in anni;

$b$  è un coefficiente che dipende dal tipo di materiale;

$r_{\text{corr}}$  è un coefficiente che dipende dal tipo di materiale e dall'ambiente nel quale si inserisce l'elemento strutturale.

La valutazione della corrosione del materiale viene fatta in termini di perdita di spessore o in perdita di massa per unità di superficie. Il coefficiente  $b$  viene fornito dalla normativa sulla base del tipo di materiale secondo la tabella 2; si deve fare riferimento ai coefficienti B2, che riguardano periodi di esposizione superiori ai 20 anni:

Metal	B1	B2
Carbon steel	0,523	0,575
Zinc	0,813	0,873
Copper	0,667	0,726
Aluminium	0,728	0,807

Il valore raccomandato per lo zinco fa tuttavia riferimento al materiale puro e, per i materiali rivestiti a caldo con zinco, il valore consigliato al paragrafo 6.2 per il coefficiente  $b$  è pari a 1.

L'Eq.(3) pertanto si riduce a:

$$D(t > 20) = r_{\text{corr}} \times t$$

Rispettivamente, per una vita nominale di 50 o 100 anni risulta:

$$D(t = 50) = r_{\text{corr}} \times 50$$

$$D(t = 100) = r_{\text{corr}} \times 100$$

Il valore per il coefficiente  $r_{\text{corr}}$  viene invece assunto sulla base delle formulazioni proposte nella normativa precedentemente analizzata UNI EN ISO 9223, nella quale viene indicato un intervallo all'interno del quale si colloca. Ipotizzando la condizione maggiormente sfavorevole risulta quindi possibile definire lo spessore corroso in ambiente C5 rispettivamente a 50 e 100 anni pari a:

$$D(t = 50) = 8,4 \times 50 = 420 \mu\text{m}$$

$$D(t = 100) = 8,4 \times 100 = 840 \mu\text{m}$$

## Acciaio inossidabile

L'impiego dell'acciaio inossidabile come armatura per calcestruzzo armato è già concesso dalla normativa italiana ed europea, tuttavia la mancanza di divulgazione nel suo utilizzo e il suo elevato costo economico non permettono la sua diffusione. Al contrario dell'acciaio zincato, che non è altro che acciaio tradizionale ricoperto da una pellicola protettiva, quello inossidabile è intrinsecamente resistente alla corrosione, per via della sua composizione chimica. L'acciaio inossidabile infatti è una lega di ferro, carbonio, nichel e cromo: sono questi ultimi due elementi che, all'atto dell'esposizione all'aria, producono un sottilissimo film di ossido che autoprotegge il materiale. Esistono diversi tipi di leghe di acciaio inossidabile, in particolare si individuano quelle martensitiche (presenza di solo cromo in percentuale variabile tra 11 e 18%), quelle ferritiche (presenza del solo cromo in percentuale variabile tra 16 e 28%) e quelle austenitiche (cromo tra il 17 e il 26% e nichel tra il 7 e il 22%). Si riporta di seguito una rassegna delle normative che consentono l'impiego di questo materiale come acciaio d'armatura e i vantaggi che se ne possono trarre in termini di durabilità del calcestruzzo.

### Eurocodice 2 – UNI EN 1992-1-1:2024

Secondo la normativa europea UNI EN 1992-1-1:2024 è esplicitamente consentito l'uso dell'acciaio inossidabile sotto forma di barre di armatura e, sfruttando le sue proprietà, è possibile aumentare la durabilità del calcestruzzo. In particolare, nell'annesso Q alla norma, viene indicato come considerare il contributo fornito dall'acciaio zincato nel calcolo del coprifero minimo per la durabilità. Si riporta di seguito la tabella Q.3 in cui viene fornito il valore  $c_{min,dur}$ :

Exposure Class	Exposure Resistance Class ERC	Stainless Steel Resistance Class <sup>a</sup>			
		SSRC1	SSRC2	SSRC3	SSRC4
XC1	$\leq$ XRC7	0	0	0	0
XC2		0	0	0	0
XC3	$\leq$ XRC4	0	0	0	0
	$\leq$ XRC7	15	0	0	0
XC4	$\leq$ XRC4	15	0	0	0
	$\leq$ XRC7	20	0	0	0
XD1, XS1	$\leq$ XRDS0,5	10	0	0	0
	$\leq$ XRDS1,5	20	10	0	0
	$\leq$ XRDS3	25	15	10	0
	$\leq$ XRDS6	35	25	15	0
	$\leq$ XRDS10	45	35	25	15
XD2, XD3, XS2, XS3	$\leq$ XRDS0,5	15	10	10	0
	$\leq$ XRDS1,5	25	20	15	0
	$\leq$ XRDS3	35	30	20	10
	$\leq$ XRDS6	50	40	30	20
	$\leq$ XRDS10	65	50	40	30

NOTE 1 The tabulated cover values apply for a design service life of 50 years unless the National Annex excludes some classes or gives other values.

NOTE 2 For a design service life of 100 years  $c_{min,dur}$  in Table Q.3 (NDP) should be increased by +10 mm for all ERC classes unless the National Annex excludes some classes or gives other values.

NOTE 3 In case of combined action of carbonation and chloride induced corrosion,  $c_{min,dur}$  in Table Q.3 (NDP) should be increased by 20 mm or a higher stainless steel resistance class should be chosen unless the National Annex gives other values.

NOTE 4 As alternative to the class system of Table Q.3 (NDP) a performance-oriented service life design may be applied if the input parameters out of technical product specifications are available.

<sup>a</sup> For stainless steel corrosion resistance classes see Table Q.2.

La scelta del copriferro minimo è funzione non solo della classe di esposizione del materiale, ma anche della classe di resistenza per pitting dell'acciaio inossidabile e della velocità di corrosione in ambiente aggressivo (carbonatazione o cloruri). La classificazione della resistenza dell'acciaio per pitting è fornita secondo la tabella Q.2 della normativa:

Stainless Steel Resistance Class	Pitting Resistance Equivalent PRE <sup>a</sup>	Description	Informative examples EN 10088-1		
			Ferritic	Duplex	Austenitic
<b>SSRC0</b>	<b>0 to 9</b>	Carbon steel reinforcement	—	—	—
<b>SSRC1</b>	<b>10 to 16</b>	Chromium steels	1.4003	—	—
<b>SSRC2</b>	<b>17 to 22</b>	Chromium Nickel steels	—	1.4482	1.4301 1.4307
<b>SSRC3</b>	<b>23 to 30</b>	Chromium Nickel steels with Molybdenum	—	1.4362	1.4401 1.4404 1.4571
<b>SSRC4</b>	<b>≥ 31</b>	Steels with increased content of Chromium and Molybdenum	—	1.4462	1.4529

<sup>a</sup> Calculation of the Pitting Resistance Equivalent:  $PRE = Cr + 3,3 \cdot Mo + n \cdot N$ ; Cr, Mo and N in M.-%.  
With:  $n = 0$  for ferritic steels,  $n = 16$  for Duplex steels and  $n = 30$  for austenitic steels.  
The calculation of the Pitting Resistance Equivalent is a useful / practical indication when classifying stainless steels. Other factors can negatively influence the corrosion resistance. The results of the test could be used as input parameters for the service life design.

Scegliendo opportunamente il tipo di acciaio inossidabile risulta possibile ridurre fortemente il copriferro di progetto, arrivando addirittura, per ambienti non eccessivamente aggressivi, a poter limitare il ricoprimento di calcestruzzo al minimo per garantire l'aderenza.

In questo modo è possibile sviluppare un approccio progettuale che compensi i maggiori costi economici dovuti all'impiego dell'acciaio zincato con il risparmio in termini di volume di calcestruzzo. Un ulteriore aspetto che non va trascurato è quello riguardante l'incremento della vita nominale della struttura: volendo garantire una vita nominale pari a 100 anni è necessario aumentare di soli 10 mm il copriferro (che per molti casi risulterebbe comunque inferiore al minimo per garantire l'aderenza), riuscendo così sostanzialmente a raddoppiare il periodo prima del quale sia necessario intervenire sul fabbricato con manutenzione straordinaria.

## Conclusioni

Osservando la situazione attuale nel mondo delle costruzioni appare chiaro come spesso gli elementi strutturali siano inutilmente sovradimensionati nelle sezioni trasversali dai progettisti, usando magari calcestruzzi con prestazioni meccaniche mediocri. Volendo raggiungere dei più alti livelli di sostenibilità delle strutture risulta fondamentale che l'Ente Normatore renda obbligatori dei requisiti minimi delle sezioni in termini di duttilità, con un conseguente maggior sfruttamento delle sezioni di calcestruzzo, riducendo inutili sprechi di materiale vergone e di conseguenza le emissioni di anidride carbonica. Per fare ciò si rende inoltre necessaria un innalzamento della resistenza minima che deve essere garantita dai calcestruzzi ad uso strutturale.

Soprattutto in zone come quella Alpina risulta fondamentale studiare in maniera esaustiva le tecniche per garantire la durabilità, in quanto l'ambiente sottopone le strutture a condizioni di saturazione da parte dell'acqua e, a causa del forte freddo presente nei mesi invernali, ai sali disgelanti che vengono sparsi. Si sono proposte sostanzialmente due alternative alle armature tradizionali, che sono le barre in acciaio zincato e le barre in acciaio inossidabile: entrambe garantiscono il raggiungimento di una vita utile della struttura molto maggiore. Ricorrere ad armature tradizionali al giorno d'oggi comporta l'impiego di un copriferro notevole, che porta a sostanziali aumenti della massa degli edifici, senza considerare che spesso in cantiere, per imprecisioni da parte degli operatori, la prescrizione di

progetto non viene rispettata (il copriferro può essere inferiore), anticipando anche di molto la corrosione delle barre stesse. D'altro canto è necessario tenere in considerazione anche i maggiori oneri derivanti dall'uso di barre non tradizionali, che possiedono un costo che è almeno doppio rispetto a quest'ultime. Grazie ad un intervento da parte delle stazioni appaltanti particolarmente virtuose, che richiedano un'elevata durabilità attraverso l'uso di barre innovative, anche a fronte di una maggiore spesa iniziale, sarebbe possibile ridurre sostanzialmente le manutenzioni alle quali deve essere sottoposta la struttura, andando di conseguenza a recuperare gli esborsi fatti in sede di costruzione. In alternativa risulterebbe necessario un intervento da parte dell'Ente Normatore che imponga l'utilizzo di questi acciai speciali.