



**MANUALE OPERATIVO PER L'USO
DELLE LINEE GUIDA PER LA
PRESCRIZIONE DELLE OPERE IN C.A.**



DEGRADO DELLE STRUTTURE IN C.A.

Durabilità delle strutture e quadro normativo

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) introducono nei principi fondamentali l'importanza dello studio dell'ambiente con le relative aggressioni sulle opere in calcestruzzo armato, al fine di garantire il raggiungimento della vita nominale prevista. Per "vita nominale" si intende il tempo durante il quale le strutture e/o i materiali conservano le loro prestazioni iniziali mantenendo il livello di sicurezza e di efficienza funzionale di progetto, per qualsiasi azione e condizione ambientale prevista (eccetto che per il periodo di riferimento per l'azioni sismiche §2.4.3. NTC DM 14/01/2008).

In questa ottica viene ricalcato il concetto di durabilità, vale a dire la capacità di conservazione delle caratteristiche fisico-meccaniche delle strutture per tutta la vita di servizio prevista in progetto senza dover far ricorso a interventi di manutenzione straordinaria. Tale obiettivo viene raggiunto anche attraverso una prescrizione corretta delle regole di maturazione, una cadenza temporale dei necessari monitoraggi sulle opere, o su particolari di esse, e azioni manutentive preventive.

Le Norme Tecniche specificano che è compito del Progettista studiare l'ambiente ove sorgerà l'opera caratterizzandolo *qualitativamente* e *quantitativamente*, poiché esso costituirà il quadro di riferimento generale per la definizione delle differenti situazioni di progetto. Perciò l'analisi ambientale, e soprattutto la conseguente identificazione della verosimile tipologia di degrado, diventa una scelta prioritaria per il Progettista, prima ancora della definizione e verifica delle sezioni di calcolo e dei requisiti del calcestruzzo mirati all'adempimento delle funzioni strettamente legate alla statica.

Tale procedimento si esplica nella definizione sia delle caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (in termini di materiali costituenti e resistenza meccanica) sia del valore dei copriferri idonei a fronteggiare le aggressioni ambientali, assicurando pienamente la durabilità dell'opera.

Nel percorrere l'iter descritto, Il Progettista trova un valido supporto nelle norme di settore: la UNI-EN 206-1 ("Calcestruzzo – specificazione, prestazione, produzione e conformità") e la UNI 11104, documento di applicazione nazionale della UNI-EN 206-1, che ne sostituisce, integra e modifica alcuni punti.



Tali norme rispondono compiutamente all'esigenza di caratterizzare in maniera qualitativa e quantitativa l'ambiente di progetto; esse si basano su una classificazione tipologica delle aggressioni attraverso 6 classi di esposizione ambientale che sono a loro volta suddivise in sottoclassi con la specifica funzione di differenziare l'intensità delle azioni di degrado.

Il passo successivo alla classificazione è rappresentato dalla scelta delle caratteristiche prestazionali del calcestruzzo da impiegare.

In questo caso le norme riportano, per ciascuna classe di esposizione e relativa sottoclasse, una prescrizione in termini di valori limite che devono essere contemporaneamente rispettati nelle proprietà del calcestruzzo affinché esso soddisfi i requisiti di durabilità dell'opera. Nello specifico sono definiti: il rapporto a/c massimo, il contenuto minimo di cemento per m³ di conglomerato e la resistenza caratteristica minima; vale la pena di sottolineare l'importanza di quest'ultima specifica in quanto non rappresenta soltanto il parametro che sta alla base delle successive considerazioni e verifiche statiche, ma sostanzialmente è l'unica proprietà controllabile in cantiere durante le fasi esecutive.

Le prescrizioni delle caratteristiche dei calcestruzzi, conformi alle classi d'esposizione ambientale, valgono per una vita nominale di 50 anni (secondo il DM 14/01/08 e Classe strutturale S4 secondo l'EC2:2005). Ad esse vanno chiaramente abbinati gli spessori corretti del copriferro previsti dall'EC2:2005 (v. oltre).

Le classi di esposizione ambientale e la specifica del calcestruzzo

Le classi di esposizione cui fare riferimento in Italia sono riportate nel *"Prospetto 1 (inserito di seguito) della norma UNI 11104"*. La prima colonna identifica la classe con una sigla in lettere (X0-XC-XD-XS-XF-XA) e le relative sottoclassi ponendo un numero dopo tale sigla; le sottoclassi (tranne per la classe X0) sono 3 o 4, a seconda dei casi, e la numerazione cresce proporzionalmente all'incremento dell'aggressione ambientale sulla parte di struttura interessata. Nella seconda colonna è descritto l'ambiente che rientra in una determinata classe, mentre nella terza colonna sono riportati gli esempi più comuni di strutture o parti di esse compresi nella classe.

È importante rilevare che, qualora sia presente più di una tipologia di degrado, è assolutamente necessario indicare tutte le classi in cui ricade la struttura (o una sua



parte); viene da sé che le caratteristiche definitive da assegnare al calcestruzzo (in termini di massimo rapporto a/c, resistenza minima a compressione e dosaggio minimo di cemento) saranno quelle corrispondenti alla classe più gravosa.

DENOMINAZIONE DELLA CLASSE	DESCRIZIONE DELL'AMBIENTE	ESEMPI INFORMATIVI DI SITUAZIONI A CUI POSSONO APPLICARSI LE CLASSI DI ESPOSIZIONE
1. Assenza di rischio di corrosione o attacco		
X0	PER CALCESTRUZZO PRIVO DI ARMATURA O INSERTI METALLICI: TUTTE LE ESPOSIZIONI ECCETTO DOVE C'È GELO E DISGELO, O ATTACCO CHIMICO. CALCESTRUZZI CON ARMATURA O INSERTI METALLICI: IN AMBIENTE MOLTO ASCIUTTO	INTERNO DI EDIFICI CON UMIDITÀ RELATIVA MOLTO BASSA. CALCESTRUZZO NON ARMATO ALL'INTERNO DI EDIFICI. CALCESTRUZZO NON ARMATO IMMERSO IN SUOLO NON AGGRESSIVO O IN ACQUA NON AGGRESSIVA. CALCESTRUZZO NON ARMATO SOGGETTO A CICLI DI BAGNATO ASCIUTTO MA NON SOGGETTO AD ABRASIONE, GELO O ATTACCO CHIMICO.
2. Corrosione indotta da carbonatazione (caso in cui il calcestruzzo contiene armature o inserti metallici ed esposto all'aria ed all'umidità)		
XC1	ASCIUTTO O PERMANENTEMENTE BAGNATO	INTERNI DI EDIFICI CON UMIDITÀ RELATIVA BASSA. CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO CON LE SUPERFICI ALL'INTERNO DI STRUTTURE CON ECCEZIONE DELLE PARTI ESPOSTE A CONDENSA, O IMMERSO IN ACQUA.
XC2	BAGNATO, RARAMENTE ASCIUTTO	PARTI DI STRUTTURE DI CONTENIMENTO LIQUIDI, FONDAZIONI. CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO PREVALENTEMENTE IMMERSO IN ACQUA O TERRENO NON AGGRESSIVO.
XC3	UMIDITÀ MODERATA	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO IN ESTERNI CON SUPERFICI ESTERNE RIPARATE DALLA PIOGGIA, O IN INTERNI CON UMIDITÀ DA MODERATA AD ALTA.
XC4	CICLICAMENTE ASCIUTTO E BAGNATO	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO IN ESTERNI CON SUPERFICI SOGGETTE A ALTERNANZE DI ASCIUTTO ED UMIDO. CALCESTRUZZI A VISTA IN AMBIENTI URBANI. SUPERFICI A CONTATTO CON L'ACQUA NON COMPRESA NELLA CLASSE XC2.
3. Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare		
XD1	UMIDITÀ MODERATA	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO IN SUPERFICI O PARTI DI PONTI E VIADOTTI ESPOSTI A SPRUZZI DI ACQUA CONTENENTE CLORURI.
XD2	BAGNATO, RARAMENTE ASCIUTTO	CALCESTRUZZO ARMATO O PRECOMPRESSO IN ELEMENTI STRUTTURALI TOTALMENTE IMMERSI IN ACQUA ANCHE INDUSTRIALE CONTENENTE CLORURI (ES. PISCINE).



XD3	CICLICAMENTE ASCIUTTO E BAGNATO	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO, DI ELEMENTI STRUTTURALI DIRETTAMENTE SOGGETTI AGLI AGENTI DISGELANTI O AGLI SPRUZZI CONTENENTI AGENTI DISGELANTI. CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO, ELEMENTI CON UNA SUPERFICIE IMMERSA IN ACQUA CONTENENTE CLORURI E L'ALTRA ESPOSTA ALL'ARIA. PARTI DI PONTI, PAVIMENTAZIONI E PARCHEGGI PER AUTO.
4. Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare		
XS1	ESPOSTO ALLA SALSEDINE MARINA MA NON DIRETTAMENTE IN CONTATTO CON L'ACQUA DI MARE	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO CON ELEMENTI STRUTTURALI SULLE COSTE O IN PROSSIMITA' DEL MARE.
XS2	PERMANENTEMENTE SOMMERSO	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO DI STRUTTURE MARINE COMPLETAMENTE IMMERSO IN ACQUA.
XS3	ZONE ESPOSTE AGLI SPRUZZI OPPURE ALLA MAREA	CALCESTRUZZO ARMATO ORDINARIO O PRECOMPRESSO CON ELEMENTI STRUTTURALI ESPOSTI ALLA BATTIGIA O ALLE ZONE SOGGETTE AGLI SPRUZZI ED ONDE DEL MARE.
5. Attacco dei cicli gelo/disgelo con o senza disgelanti		
XF1	MODERATA SATURAZIONE DI ACQUA, IN ASSENZA DI AGENTE DISGELANTE	SUPERFICI VERTICALI DI CALCESTRUZZO COME FACCIATE E COLONNE ESPOSTE ALLA PIOGGIA ED AL GELO. SUPERFICI NON VERTICALI E NON SOGGETTE ALLA COMPLETA SATURAZIONE MA ESPOSTE AL GELO, ALLA PIOGGIA O ALL'ACQUA.
XF2	MODERATA SATURAZIONE DI ACQUA IN PRESENZA DI AGENTE DISGELANTE	ELEMENTI COME PARTI DI PONTI CHE IN ALTRO MODO SAREBBERO CLASSIFICATI COME XF1 MA CHE SONO ESPOSTI DIRETTAMENTE O INDIRECTAMENTE AGLI AGENTI DISGELANTI.
XF3	ELEVATA SATURAZIONE DI ACQUA IN ASSENZA DI AGENTE DISGELANTE	SUPERFICI ORIZZONTALI IN EDIFICI DOVE L'ACQUA PUO' ACCUMULARSI E CHE POSSONO ESSERE SOGGETTI AI FENOMENI DI GELO, ELEMENTI SOGGETTI A FREQUENTI BAGNATURE ED ESPOSTI AL GELO.
XF4	ELEVATA SATURAZIONE DI ACQUA CON PRESENZA DI AGENTE ANTIGELO OPPURE ACQUA DI MARE	SUPERFICI ORIZZONTALI QUALI STRADE O PAVIMENTAZIONI ESPOSTE AL GELO ED AI SALI DISGELANTI IN MODO DIRETTO O INDIRECTO, ELEMENTI ESPOSTI AL GELO E SOGGETTI A FREQUENTI BAGNATURE IN PRESENZA DI AGENTI DISGELANTI O DI ACQUA DI MARE.
6. Attacco chimico		
XA1	AMBIENTE CHIMICAMENTE DEBOLMENTE AGGRESSIVO SECONDO IL PROSPETTO 2 DELLA UNI EN 206-1	CONTENITORI DI FANGHI E VASCHE DI DECANTAZIONE. CONTENITORI E VASCHE PER ACQUE REFLUE.
XA2	AMBIENTE CHIMICAMENTE MODERATAMENTE AGGRESSIVO SECONDO IL PROSPETTO 2 DELLA UNI EN 206-1	ELEMENTI STRUTTURALI O PARETI A CONTATTO DI TERRENI AGGRESSIVI.
XA3	AMBIENTE CHIMICAMENTE FORTEMENTE AGGRESSIVO SECONDO IL PROSPETTO 2 DELLA UNI EN 206-1	ELEMENTI STRUTTURALI O PARETI A CONTATTO DI ACQUE INDUSTRIALI FORTEMENTE AGGRESSIVE. CONTENITORI DI FORAGGI, MANGIMI E LIQUAMI PROVENIENTI DALL'ALLEVAMENTO ANIMALE. TORRI DI RAFFREDDAMENTO DI FUMI E GAS DI SCARICO INDUSTRIALI.

Durabilità calcestruzzo classi di esposizione in relazione alle condizioni ambientali (Norma UNI 11104 – Prospetto 1)



Classe X0: Assenza di rischio di corrosione o attacco

Questa classe descrive ambienti nei quali non esiste alcun rischio di degrado del calcestruzzo, indipendentemente dalla sua composizione.

La norma UNI 11104 include nella classe X0 i calcestruzzi privi di armatura o inserti metallici soggetti a differenti esposizioni, escludendo i casi in cui sia presente un'azione di gelo/disgelo o attacco chimico. Fanno parte di questa classe anche i calcestruzzi con armatura non strutturale in ambiente molto asciutto (es. pavimentazioni industriali interne), per i quali risulta trascurabile l'attacco per carbonatazione.

La UNI 11104 non dà indicazioni sui valori limite per i dosaggi minimi di cemento e per il rapporto a/c massimo, ma riporta solo la classe di resistenza minima pari C(12/15).

Classe XC: Corrosione delle armature promossa dalla carbonatazione

In condizioni normali le armature all'interno del calcestruzzo si trovano in una condizione di "passivazione" dovuta alla reazione chimica di idratazione del cemento, che ha tra i risultati lo sviluppo d'idrossido di calcio (calce); esso contribuisce ad innalzare la basicità del calcestruzzo, portandolo a valori di pH superiori a 13.

L'elevato pH del conglomerato che si trova direttamente a contatto con le barre di armatura produce una sorta di rivestimento protettivo con notevole capacità isolante. Tale barriera è costituita da uno strato di ossido ferrico compatto, denso, aderente al sottostante strato metallico e impermeabile sia all'ossigeno che all'umidità; la velocità di corrosione risulta, pertanto, contenuta a livelli pressoché trascurabili.

Con il termine carbonatazione si intende il processo mediante il quale l'anidride carbonica penetra attraverso il copriferro e reagisce con l'idrossido di calcio presente nella pasta cementizia idratata, determinando una notevole riduzione della basicità del conglomerato sino a valori di pH prossimi a 9.

Come conseguenza il ferro di armatura, che si trovava precedentemente in uno stato a pH più elevato, perde la sua "passività", trasformando lo strato di ossido che avvolge le barre da elemento difensivo a elemento incoerente e poroso, tanto da ridurre drasticamente le caratteristiche protettive.

Una volta venuta meno l'impermeabilità della pellicola, i metalli restano direttamente esposti al contatto con l'ambiente che li circonda; con l'apporto di ossigeno e acqua, permeati dalla superficie di un calcestruzzo tendenzialmente poroso, si instaura un processo chimico di ossido-riduzione con l'armatura metallica (catodo) seguito dalla



formazione di ruggine, che comporta un aumento di volume pari a circa 7 volte quello iniziale occupato dalla barra.

La ruggine genera delle tensioni interne di compressione sul calcestruzzo e delle tensioni di trazione in superficie, determinando la comparsa di fessure superficiali che corrono parallelamente ai ferri di armatura, che aumentano progressivamente e culminano con l'espulsione totale del copriferro negli spigoli ("spalling") o con la sua delaminazione nelle superfici piane e verticali.

In conclusione va comunque evidenziato come l'innesco della corrosione (una volta che il fronte di carbonatazione ha raggiunto l'armatura distruggendone la naturale protezione) richieda la contemporanea presenza di acqua e ossigeno.

La breve analisi del meccanismo di corrosione promossa dalla carbonatazione serve a comprendere meglio la classificazione della UNI 11104, alla base della quale stanno sia le considerazioni appena viste, di carattere teorico, sia una serie di prove sperimentali in laboratorio.

CLASSE XC1: si riferisce a calcestruzzi armati da mettere in opera in ambienti con umidità relativa molto bassa (ambiente secco) e superfici esposte all'interno di edifici. Tale classe può includere le seguenti tipologie strutturali: scale interne di edifici, solai, travi, pilastri, setti, vani ascensori.

CLASSE XC2: si riferisce a calcestruzzi armati immersi in acqua o in terreni non aggressivi e comunque in ambienti raramente secchi, costantemente a contatto con umidità molto elevate. Esempi tipici di strutture in XC2 sono: vasche di contenimento per liquidi non aggressivi, strutture idrauliche, muri contro terra, pali, diaframmi e fondazioni dirette, tutti messi in opera in terreni non aggressivi.

CLASSE XC3: si riferisce a calcestruzzi armati in presenza di livelli di umidità medio-alti, generalmente posti in ambienti esterni riparati dall'azione diretta della pioggia. Include, in particolare, la realizzazione di elementi strutturali quali pilastri esterni, muri parzialmente riparati da pioggia, scale esterne protette dalla pioggia, cordoli esterni di edifici protette dalla pioggia, strutture all'interno di edifici industriali o impianti sportivi caratterizzati da elevati tenori di umidità, etc..



CLASSE XC4: si riferisce a calcestruzzi armati per strutture esterne esposte direttamente alla pioggia come pavimenti esterni non soggetti a cicli di gelo e disgelo, terrazze non coperte, muri, pile da ponte, pensiline e altri elementi strutturali a vista esposti ciclicamente a condizioni di asciutto e bagnato.

Nel “*Prospetto 4 della UNI 11104*” sono indicati i valori limite per le proprietà del calcestruzzo al fine di assicurare la durabilità della struttura in progetto.

Da una prima analisi risulta evidente che le condizioni meno aggressive sono la XC1 e la XC2; infatti, grazie all'assenza pressoché totale di acqua e nonostante vi sia in atto un processo di carbonatazione (XC1), o della difficoltà dell'aria (quindi di ossigeno e anidride carbonica) a permeare i pori di calcestruzzo sempre saturi di acqua (XC2), non si verificano rilevanti processi di corrosione. Di conseguenza il rapporto a/c massimo fissato per proteggere i ferri di armatura risulta relativamente elevato (pari a 0,60); ne discende che la resistenza caratteristica minima, legata indissolubilmente al rapporto a/c, debba essere non inferiore a 30 N/mm².

La classe XC3 ha condizioni intermedie di aggressività, in quanto in ambienti moderatamente umidi vi è carenza di acqua.

Le condizioni più aggressive, infine, corrispondono alla XC4 dove si verifica a fasi alterne ingresso di aria secca (contente ossigeno e anidride carbonica) e di acqua (capace di innescare la corrosione) a seguito dell'esposizione alle piogge.

Classi XD e XS: Corrosione delle armature indotta dai cloruri

Si è già visto che un ferro d'armatura immerso nel calcestruzzo a pH prossimi a 13 è difeso da uno strato protettivo, che agisce da neutralizzatore di possibili fenomeni di corrosione elettrolitica. Nel momento in cui il cloro giunge a contatto con lo strato passivante questo viene distrutto, causando l'innescare di una serie di reazioni elettrochimiche che portano inevitabilmente al progressivo danneggiamento delle barre d'armatura. Affinché ciò avvenga, occorre la contemporanea presenza di ossigeno e di sufficienti concentrazioni di cloruro.

L'attacco può aver luogo per una concentrazione di cloruri relativamente modesta quando il calcestruzzo è esposto all'atmosfera, dove l'ossigeno può raggiungere facilmente le armature; è invece necessario un tenore molto più elevato quando il calce-



struzzo è totalmente immerso in acque contenenti cloruri (marine e non) dove comunque l'apporto di ossigeno risulta ostacolato dall'imbibizione dei pori della matrice legante.

La rottura dello strato di protezione provocata dai cloruri ha luogo in forma localizzata; il meccanismo con cui avanza la corrosione, inoltre, tende a stabilizzare la localizzazione dell'attacco, poiché si crea una concentrazione di cloruri e un abbassamento del pH all'interno della zona di corrosione, e a rinforzare il film passivo in quella circostante. Si comprende quindi come la morfologia dell'attacco sia quella tipica della forma di corrosione localizzata con la comparsa di "crateri".

Il fenomeno di corrosione localizzata, meglio noto come *pitting* (dall'inglese "pit" = "cratere"), può raggiungere valori di velocità corrosiva piuttosto significativi; in calcestruzzo umido e con elevato contenuto di cloruri in prossimità delle armature, si possono anche raggiungere velocità di penetrazione di 1÷1,5 mm/anno.

In pratica l'attacco corrosivo, una volta innescato, può portare in tempi piuttosto brevi a riduzioni inaccettabili della sezione delle armature o, peggio, al troncamento, anche nelle comuni condizioni di esposizione atmosferica.

Malgrado il meccanismo di corrosione promosso dai cloruri sia il medesimo a prescindere dalla loro provenienza, la classificazione della norma UNI 11104 divide in due classi differenti l'attacco da cloruri: quelli provenienti dal mare (XS) e quelli provenienti da altre fonti (XD), come da vasche di processi industriali, piscine, infrastrutture viarie sottoposte ai sali disgelanti, etc.

Il motivo della diversificazione è da ascrivere a due peculiarità dell'ambiente marino. Innanzitutto i cristalli dei sali depositati dall'acqua, nei periodi di alta marea, aumentano di volume nella fase successiva di bassa marea generando tensioni nella pasta cementizia capaci di produrre fessurazioni e delaminazioni; secondariamente esiste l'effetto abrasivo sul conglomerato per effetto dei solidi in sospensione agitati dal moto ondoso.

Il maggior degrado che subisce il calcestruzzo si riflette, ovviamente, sulla velocità di penetrazione dei cloruri con attacco precoce dei ferri.

CLASSE XD1: si riferisce a calcestruzzi armati da mettere in opera in ambienti con umidità relativa moderata, soggette a spruzzi di acque contenenti cloruri, ad esempio pavimentazioni esterne, parti di ponti regolarmente investite da nebbie saline, come le pile e le spalle dei sovrappassi stradali e la zona inferiore degli impalcati dei ponti.



CLASSE XD2: si riferisce a calcestruzzi armati immersi in acque contenenti cloruri, raramente asciutti. Esempi tipici di strutture sono: vasche di contenimento per liquidi industriali contenenti cloruri, piscine, etc.

CLASSE XD3: include calcestruzzi armati di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti, quindi parti di ponti esposte in maniera diretta a spruzzi di acqua contenente cloruri, pavimentazioni di parcheggi, imbocchi di gallerie, nonché tutte le opere adibite allo scolo e allontanamento delle acque dalla sede stradale.

Per l'ambiente marino si hanno le seguenti tre classi.

CLASSE XS1: che comprende i calcestruzzi armati raggiunti dall'aerosol marino; il trasporto dei cloruri avviene per via eolica, investendo tutte le strutture site in prossimità delle coste e distanti fino a 2-3 km dal mare.

CLASSE XS2: si riferisce a calcestruzzi armati totalmente immersi in acqua marina per i quali l'attacco non giunge tanto dal cloruro, quanto dall'azione abrasiva delle correnti marine subacquee più o meno profonde.

CLASSE XS3: include calcestruzzi armati in ambienti marini ciclicamente asciutti e bagnati, quindi fa riferimento a tutte le strutture esposte alla battigia, agli spruzzi e all'azione delle onde: banchine e piazzali portuali di movimentazione merci, moli, bacini di carenaggio, etc.

Nel "*Prospetto 4 della UNI 11104*" sono indicati i valori limite per le proprietà del calcestruzzo; è immediato osservare quanto sia restrittiva la prescrizione per l'ambiente marino.

Classe XA: Attacco chimico del calcestruzzo

Questo tipo di ammaloramento è più diffuso di quanto non si creda e investe le strutture a contatto con acque o terreni contenenti sostanze chimiche in grado di reagire con alcuni componenti presenti nella pasta di cemento idratata.



Sono innumerevoli le sostanze chimiche che possono promuovere i processi di degrado delle strutture in calcestruzzo e, in linea generale, caratterizzano prevalentemente gli ambienti acidi.

MAGNESIO (Mg^{++}) e L'AMMONIO (NH_4^+): generalmente presenti nei più diffusi fertilizzanti usati in agricoltura, danno luogo ad una reazione con lo ione calcio dei prodotti di idratazione del cemento generando sali solubili di calcio che vengono facilmente rimossi dall'azione delle acque. Il magnesio, in particolare, si sostituisce ai composti che garantiscono la resistenza meccanica generando un silicato idrato responsabile della perdita parziale delle prestazioni meccaniche del conglomerato.

ANIDRIDE CARBONICA LIBERA: (cioè non combinata in forma di carbonati o bicarbonato) presente nelle acque in forma di acido carbonico (H_2CO_3), reagisce inizialmente con la calce della pasta di cemento formando carbonato di calcio il quale, successivamente, può ulteriormente reagire con l'acido carbonico circostante formando il bicarbonato di calcio; quest'ultimo, per la sua elevata solubilità, viene asportato dalla pasta di cemento.

Esiste nelle acque una concentrazione (teorica) di CO_2 libera che è in grado di garantire l'equilibrio, evitando la formazione del bicarbonato di calcio. L'anidride carbonica "aggressiva" rappresenta l'eccesso di anidride carbonica libera nelle acque oltre il valore di equilibrio, cui consegue la formazione del bicarbonato che viene facilmente dilavato dall'acqua a contatto con la struttura. In pratica, la matrice cementizia subisce una perdita di massa con conseguente aumento della porosità e riduzione delle prestazioni meccaniche.

Il più diffuso e pericoloso effetto di degrado della classe XA è senza dubbio rappresentato dai SOLFATI presenti nei terreni e nelle acque a contatto con le strutture. Il solfato può provenire o dagli scarichi industriali (artificiale) o dalla decomposizione biologica (naturale) di sostanze organiche contenenti zolfo come avviene per le piante o per i concimi. I terreni alluvionali e quelli coerenti, inoltre, possono contenere pirite (solfuro di ferro) che in alcune situazioni può dare origine alla formazione massiccia di gesso ($CaSO_4$).

In ultimo occorre segnalare che gli impianti fognari, le vasche di depurazione e quelle per la raccolta dei liquami sono un ricettacolo di solfati; in questi casi è facile reperire le



analisi chimiche effettuate con regolarità dalle Società di gestione, andando immediatamente a individuare la classe di appartenenza.

Gli effetti di degrado causati dall'attacco solfatico si manifestano sotto forma di espansioni o disallineamenti delle strutture, cui consegue la nascita di quadri fessurativi e di espulsioni di parti dell'elemento; in condizioni estreme si giunge alla completa disgregazione della matrice legante che all'aspetto si presenta come una terra incoerente.

Al fine di classificare il grado di aggressione, la norma UNI 11104 rimanda al "Prospetto 2 della UNI-EN 206-1", dove sono elencate le più diffuse tipologie di agenti chimici e la loro concentrazione. Sarà necessario, pertanto, accertare le caratteristiche dell'ambiente eseguendo le dovute analisi chimiche.

GLI AMBIENTI CHIMICAMENTE AGGRESSIVI CLASSIFICATI DI SEGUITO SONO BASATI SUL SUOLO NATURALE E PER ACQUA NEL TERRENO A TEMPERATURE DELL'ACQUA/TERRENO COMPRESSE TRA 5-25 °C ED UNA VELOCITÀ DELL'ACQUA SUFFICIENTEMENTE BASSA DA POTER ESSERE APPROSSIMATA A CONDIZIONI STATICHE. LA CONDIZIONE PIÙ GRAVOSA PER OGNIUNA DELLE CONDIZIONI CHIMICHE DETERMINA LA CLASSE DI ESPOSIZIONE. SE DUE O PIÙ CARATTERISTICHE DI AGGRESSIVITÀ APPARTENGONO ALLA STESSA CLASSE, L'ESPOSIZIONE SARÀ CLASSIFICATA NELLA CLASSE PIÙ ELEVATA SUCCESSIVA, SALVO IL CASO CHE UNO STUDIO SPECIFICO PROVI CHE CIÒ NON È NECESSARIO.				
CARATTERISTICA CHIMICA	METODO DI PROVA DI RIFERIMENTO	XA1	XA2	XA3
ACQUA NEL TERRENO				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 e ≤ 600	> 600 e ≤ 3.000	> 3.000 e ≤ 6.000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 e ≥ 5,5	< 5,5 e ≥ 4,5	< 4,5 e ≥ 4,0
CO ₂ mg/l aggressiva	prEN 13577:1999	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 fino a saturazione
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 oppure ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 e ≤ 1.000	> 1.000 e ≤ 3.000	> 3.000 fino a saturazione
TERRENO				
SO ₄ ²⁻ mg/Kg ^{a)} totale	EN 196-2 ^{b)}	≥ 2.000 e ≤ 3.000 ^{c)}	> 3.000 ^{c)} e ≤ 12.000	> 12.000 e ≤ 24.000
Acidità ml/Kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Non incontrato in pratica	
^{a)} I TERRENI ARGILLOSI CON UNA PERMEABILITÀ MINORE DI 10-5 M/S POSSONO ESSERE CLASSIFICATI IN UNA CLASSE INFERIORE. ^{b)} IL METODO DI PROVA PRESCRIVE L'ESTRAZIONE DI SO ₄ ²⁻ MEDIANTE ACIDO CLORIDRICO; IN ALTERNATIVA SI PUÒ USARE L'ESTRAZIONE CON ACQUA SE NEL LUOGO DI IMPIEGO DEL CALCESTRUZZO C'È QUESTA PRATICA ^{c)} IL LIMITE DI 3.000 MG/KG DEVE ESSERE RIDOTTO A 2.000 MG/KG SE ESISTE IL RISCHIO DI ACCUMULO DI IONI SOLFATO NEL CALCESTRUZZO CAUSATO DA CICLI DI ESSICCAMENTO/BAGNATURA OPPURE SUZIONE CAPILLARE.				



Valori limite per le classi di esposizione all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno (prospetto 2 norma uni en 206).

Un altro valido contributo della UNI 11104 al Progettista, è rappresentato dall'indicazione di alcune delle più diffuse strutture che ricadono nelle diverse classi di esposizione ambientale.

Nel "Prospetto 4 della UNI 11104" sono indicati i valori limite per le proprietà del calcestruzzo.

È importante evidenziare che per le classi XA2 e XA3 la norma stabilisce, oltre alle ordinarie prescrizioni, l'utilizzo di un cemento resistente ai solfati conforme alla UNI 9156 ("Cementi resistenti ai solfati - Composizione e classificazione"). In generale in tutte le classi XA è previsto cemento resistente al dilavamento della calce, conforme alla UNI 9606 ("Cementi resistenti al dilavamento della calce - Composizione e classificazione"), in caso di contatto con acque contenenti anidride carbonica aggressiva.

CLASSE D'ESPOSIZIONE	CARATTERISTICA DEL CEMENTO (UNI 9156)
XA2	Alta Resistenza chimica ai Solfati (ARS)
XA3	Altissima Resistenza chimica ai Solfati (AARS)

CLASSE D'ESPOSIZIONE	CARATTERISTICA DEL CEMENTO (UNI 9606)
XA1	Moderata Resistenza al dilavamento (MRD)
XA2	Alta Resistenza al dilavamento (ARD)
XA3	Altissima Resistenza al dilavamento (AARD)

In conclusione occorre far presente che, qualora in alcuni ambienti particolarmente severi i valori delle concentrazioni di sostanza dovessero superare i limiti del prospetto 2 della UNI-EN 206-1, si rende indispensabile la protezione delle superfici a contatto con l'ambiente prescrivendo guaine, resine o pitture impermeabilizzanti.

Classe XF: Attacco fisico del calcestruzzo per cicli di gelo e disgelo

La formazione di ghiaccio nelle strutture in calcestruzzo può causare danneggiamenti anche gravi. Il degrado si manifesta inizialmente sotto forma di dilavamento della pasta di



cemento superficiale, con messa a nudo degli aggregati, e in fase avanzata sotto forma di scagliature e delaminazioni degli strati più esterni; in alcune strutture orizzontali il processo può addirittura culminare con la formazione di crateri tronco-conici profondi diversi centimetri e di diametro variabile da 10 a 30 cm.

Il ghiaccio si forma solo se è presente dell'acqua all'interno delle porosità della matrice cementizia. Per essere più precisi, il danneggiamento ha luogo solo quando si raggiunge o si supera un determinato grado di saturazione (espresso come rapporto volume d'acqua/volume dei pori), detto "saturazione critica".

In un qualsiasi recipiente chiuso il valore di saturazione critica è pressoché pari al 92%; superata tale quota nascono delle tensioni sul recipiente. Il calcestruzzo è però un contenitore "anomalo" poiché, anche per gradi di saturazione inferiori al 92%, si possono generare tensioni di trazione nella matrice legante responsabili dei danneggiamenti appena descritti; questo abbassamento della soglia di saturazione è dovuto al fatto che l'acqua è distribuita nelle porosità in modo casuale e disuniforme, creando locali scavalcamenti di tale limite.

In sostanza, ciò che conta è valutare le condizioni di smaltimento delle acque dalle zone corticali delle strutture, considerando che maggiore è la velocità di smaltimento e minore risulterà il grado di saturazione locale dell'elemento. In quest'ottica si muove la norma UNI 11104 per la classificazione.

La soluzione al problema della gelività del calcestruzzo è rappresentata dall'impiego dei cosiddetti additivi aeranti all'atto del confezionamento in centrale di betonaggio. Il loro compito è quello di stabilizzare (la norma usa impropriamente il termine "aggiungere") l'aria presente nell'impasto assicurando la formazione di un sistema di microbolle omogeneamente disperso nella matrice cementizia, ove la pressione dell'acqua liquida (generata dalla formazione del ghiaccio nei pori capillari) possa scaricarsi prima di superare la resistenza del materiale. Sostanzialmente l'aggiunta d'aria consente di innalzare la soglia di saturazione critica evitando il degrado.

Il livello di aggressività sul calcestruzzo dipende prevalentemente dal maggiore o minore grado di saturazione, ma anche dalla presenza o meno di sali disgelanti (quindi cloruri), i quali esplicano un ulteriore degrado di tipo fisico sul conglomerato cementizio oltre all'azione corrosiva dei ferri già contemplata nella classe XD.



La norma UNI 11104 tiene conto, nella classificazione, di tutti questi fattori che sono stati determinati e studiati attraverso sperimentazioni di laboratorio e prove su strutture in vera grandezza.

CLASSE XF1: si riferisce a elementi verticali, in clima rigido, non soggetti ai sali disgelanti, quali facciate, travi a vista e colonne esposte alla pioggia e al gelo.

CLASSE XF2: si riferisce alle strutture verticali, in clima rigido, sottoposte all'azione diretta o indiretta (spruzzi o schizzi) dei sali disgelanti, tipo le infrastrutture viarie, parti verticali di ponti e viadotti e paramenti di muri di sostegno.

CLASSE XF3: contempla tutti gli elementi orizzontali, in clima rigido, in assenza di sali disgelanti (dove si ha un elevato grado di saturazione dei pori dovuto alla minore velocità di scolo delle acque) quali sbalzi, terrazze, coperture piane, pensiline, etc.

CLASSE XF4: comprende tutte le superfici orizzontali, in clima rigido, a contatto diretto o indiretto (spruzzi o schizzi) con i sali disgelanti; si tratta di strade o pavimentazioni esterne, parcheggi e piazzali.

In coerenza con la classificazione si hanno le consuete prescrizioni normative sui valori limite per le caratteristiche dei calcestruzzi.

Per la classe XF1 la norma non considera necessaria l'aggiunta d'aria poiché è provato che le tensioni di trazione indotte dal modesto grado di saturazione sono generalmente tollerate da calcestruzzi con resistenza caratteristica minima di 40 N/mm^2 . Per le restanti classi viene prescritto un valore minimo d'aria del 3% (generalmente si utilizzano valori intorno al 5%).

L'introduzione di aria nel calcestruzzo, a parità di rapporto a/c, produce un naturale abbattimento della resistenza a compressione del materiale; tale riduzione è già stata presa in conto dalla norma, quindi i valori di resistenza minimi da utilizzare nei calcoli statici saranno quelli indicati nel "*Prospetto 4 della UNI 11104*".

Infine, la norma recepisce l'importanza di utilizzare aggregati resistenti al gelo, cioè aventi bassa porosità. Infatti, gli aggregati utilizzati nel confezionamento dei calcestruzzi appartenenti ad altre classi d'esposizione sono caratterizzati da porosità tra loro interconnesse la cui dimensione media è generalmente superiore a quella dei pori capillari



della matrice cementizia; una frazione dell'acqua contenuta all'interno dell'aggregato può congelare per valori di temperatura di poco inferiori a 0°C determinando l'espulsione della restante acqua liquida che genera, quindi, una pressione idraulica aggiuntiva nel calcestruzzo.

Il rispetto del requisito di resistenza al gelo secondo la UNI-EN 12620 è verificabile acquisendo il certificato di "marcatura CE" degli aggregati.

A titolo informativo occorre segnalare che, in linea generale, il problema dei cicli di gelo/disgelo diventa sensibile, e quindi va preso in conto, per altezze medie del sito di progetto superiori ai 600-700 m sul livello del mare.



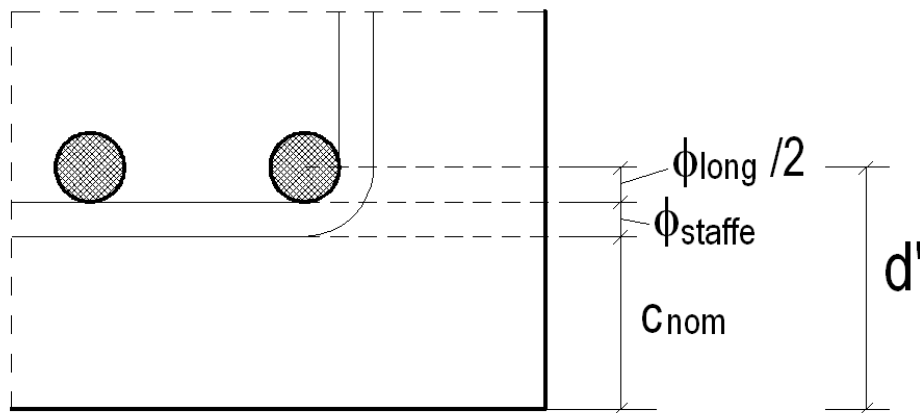
	NESSUN RISCHIO DI CORROSIONE DELLE ARMATURE	CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DALLA CARBONATAZIONE				CORROSIONE DELLE ARMATURE INDOTTA DAI CLORURI						ATTACCO DAI CICLI DI GELO/DISGELO				AMBIENTE AGGRESSIVO PER ATTACCO CHIMICO		
						ACQUA DI MARE			CLORURI PROVENIENTI DA ALTRE FONTI									
						X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1							
MASSIMO RAPPORTO a/c	-	0,60		0,55	0,50	0,50	0,45		0,55	0,50	0,45	0,50	0,50		0,45	0,55	0,50	0,45
MINIMA CLASSE DI RESISTENZA	C12/15	C25/30		C28/35	C32/40	C32/40	C35/45		C28/35	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30		C28/35	C28/35	C32/40	C35/45
MINIMO CONTENUTO IN CEMENTO (Kg/m³)		300		320	340	340	360		320	340	360	320	340		360	320	340	360
CONTENUTO MINIMO IN ARIA (%)													3,0 (a)					
ALTRI REQUISITI												AGGREGATI CONFORMI ALLA UNI EN 12620 DI ADEGUATA RESISTENZA AL GELO/DISGELO				È RICHIESTO L'IMPIEGO DI CEMENTI RESISTENTI AI SOLFATI (b)		
(a) QUANDO IL CALCESTRUZZO NON CONTIENE ARIA AGGIUNTA, LE SUE PRESTAZIONI DEVONO ESSERE VERIFICATE RISPETTO AD UN CALCESTRUZZO AERATO PER IL QUALE È PROVATA LA RESISTENZA AL GELO/DISGELO, DA DETERMINARSI SECONDO UNI 7087, PER LA RELATIVA CLASSE DI ESPOSIZIONE.																		
(b) QUALORA LA PRESENZA DI SOLFATI COMPORTI LE CLASSI DI ESPOSIZIONE XA2 E XA3 È ESSENZIALE UTILIZZARE UN CEMENTO RESISTENTE AI SOLFATI SECONDO LA UNI 9156.																		

Durabilità calcestruzzo valori limiti per la composizione e le proprietà del calcestruzzo (Prospetto 4 della norma UNI 11104)

Determinazione del copriferro nominale

Si è detto che le caratteristiche del calcestruzzo dettate dalla norma UNI 11104 valgono soltanto se il copriferro è valutato correttamente in fase progettuale e, ovviamente, garantito in fase esecutiva.

L'EC2 definisce COPRIFERRO NOMINALE (c_{nom}) la distanza tra la superficie dell'armatura più esterna e la faccia del calcestruzzo più prossima. Tale valore non va confuso con il parametro (d') utilizzato nei calcoli per la definizione dell'altezza utile della sezione (d).



Il c_{nom} , che va indicato obbligatoriamente nei disegni esecutivi, è così definito:

$$c_{nom} \text{ [mm]} = c_{min} + \Delta c = \max (c_{min,b}; c_{min,dur}; c_{min, fuoco}) + 10$$

dove:

- c_{min} = copriferro minimo per soddisfare i requisiti di aderenza, durabilità ed eventuale resistenza al fuoco; esso corrisponderà al maggiore dei tre valori;
- Δc = tolleranza di posizionamento delle armature, pari a 10mm⁽¹⁾;
- $c_{min,b} = \varnothing \sqrt{n_b}$ = copriferro minimo per garantire l'aderenza, pari al diametro per il numero di barre nel caso di eventuali gruppi di barre;
- $c_{min, fuoco}$ = garantisce la resistenza all'incendio (gli spessori sono riportati in EN 1992-1-2 e nel recente DM 16/02/07);

⁽¹⁾ Si assume un valore di 5 mm quando si opera in regime di "garanzia di qualità", che prevede un'accurata verifica in opera degli spessori effettivi del copriferro, nonché del corretto posizionamento delle armature.



- $c_{min,dur}$ = copriferro minimo per garantire la durabilità dell'opera, definito dalle classi di esposizione.

Nella tabella seguente sono riassunti i valori dei prospetti 4.4N e 4.5N dell'EC2, che si riferiscono a strutture con vita utile di 50 e 100 anni.

CLASSE D'ESPOSIZIONE AMBIENTALE	SPESSORE MINIMO DI COPRIFERRO			
	VITA UTILE 50 ANNI		VITA UTILE 100 ANNI	
	C.A.	C.A.P.	C.A.	C.A.P.
X0	10	10	20	20
XC1	15	25	25	35
XC2, XC3	25	35	35	45
XC4	30	40	40	50
XS1, XD1	35	45	45	55
XS2, XD2	40	50	50	60
XS3, XD3	45	55	55	65

Spessori minimi del copriferro secondo i prospetti 4.4N e 4.5N dell'EC 2:2005

Nel caso di calcestruzzi a contatto con superfici irregolari, i valori del c_{min} debbono essere incrementati per tener conto delle maggiori tolleranze di esecuzione previste. L'incremento è proporzionale all'entità delle prevedibili irregolarità.

Il copriferro minimo deve essere almeno pari a 40 mm per un calcestruzzo gettato in opera contro terreni trattati (compreso calcestruzzo di spianatura: plinti su magrone e pavimentazioni industriali su massiciata) e a 75 mm per un calcestruzzo gettato direttamente contro il terreno senza lisciatura delle pareti verticali di scavo (per es. muri contro terra o di sostegno). Tali valori tengono già conto della difficoltà o impossibilità, per le strutture di fondazione e contro terra, di rilevare visivamente un processo degenerativo del calcestruzzo e/o dei ferri d'armatura.



SPECIFICA DEL CALCESTRUZZO NORMA EUROPEA UNI EN 206-1

(ART. 3 DEFINIZIONI)

PRESCRITTORE: PERSONA OPPURE ORGANIZZAZIONE CHE STABILISCE LA SPECIFICA DEL CALCESTRUZZO FRESCO E INDURITO (ES. PROGETTISTA, COMMITTENZA)

PRODUTTORE: PERSONA OPPURE ORGANIZZAZIONE CHE PRODUCE IL CALCESTRUZZO FRESCO.

UTILIZZATORE: PERSONA OPPURE ORGANIZZAZIONE CHE IMPIEGA CALCESTRUZZO FRESCO NELL'ESECUZIONE DI UNA COSTRUZIONE O UN MANUFATTO (ES. IMPRESA)

CAPITOLATO: COMPILAZIONE FINALE DI REQUISITI TECNICI DOCUMENTATI, FORNITI AL PRODUTTORE IN TERMINI DI PRESTAZIONI.

CALCESTRUZZO A PRESTAZIONE GARANTITA: CALCESTRUZZO LE CUI PROPRIETÀ RICHIESTE E CARATTERISTICHE ADDIZIONALI SONO SPECIFICATE AL PRODUTTORE IL QUALE È RESPONSABILE DELLA FORNITURA DI UN CALCESTRUZZO CONFORME ALLE PROPRIETÀ RICHIESTE E ALLE CARATTERISTICHE ADDIZIONALI (Cfr. anche Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Calcestruzzo Preconfezionato).

(ART. 6 SPECIFICA DEL CALCESTRUZZO)

IL PRESCRITTORE DEL CALCESTRUZZO DEVE ASSICURARE CHE TUTTI I REQUISITI SIGNIFICATIVI PER LE PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO SIANO INCLUSI NELLA SPECIFICA FORNITA AL PRODUTTORE. IL PRESCRITTORE DEVE INOLTRE SPECIFICARE QUEI REQUISITI PER LE PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO CHE SONO NECESSARIE PER IL TRASPORTO DOPO LA CONSEGNA, LA POSA IN OPERA, LA COMPATTAZIONE, LA MATURAZIONE O PER ULTERIORI TRATTAMENTI.



LA SPECIFICA DEVE INCLUDERE, SE NECESSARIO, REQUISITI SPECIALI (ES. PER OTTENERE UNA FINITURA ARCHITETTONICA).

IL PRESCRITTORE DEVE TENERE CONTO:

- DELLE AZIONI AMBIENTALI A CUI IL CALCESTRUZZO SARÀ ESPOSTO;
- DELLE DIMENSIONI DELLA STRUTTURA (ES. SVILUPPO DI CALORE);
- DEI REQUISITI RELATIVI AL COPRIFERRO O ALLA MINIMA LARGHEZZA DELLE SEZIONI, PER ESEMPIO LA DIMENSIONE MASSIMA NOMINALE DELL'AGGREGATO;
- DELLE RESTRIZIONI ALL'USO DI MATERIALI COMPONENTI DI IDONEITÀ STABILITA, PER ESEMPIO IN CONSEGUENZA DELLE CLASSI DI ESPOSIZIONE;
- DEI REQUISITI PER L'AGGREGATO ESPOSTO O PER LE FINITURE LAVORATE DEL CALCESTRUZZO;
- DELL'APPLICAZIONE DEL CALCESTRUZZO FRESCO E INDURITO;
- DELLE CONDIZIONI DI MATURAZIONE.



SPECIFICA DEL CALCESTRUZZO A PRESTAZIONE GARANTITA:

IL CALCESTRUZZO A PRESTAZIONE GARANTITA DEVE ESSERE SPECIFICATO PER MEZZO DEI REQUISITI DI BASE CHE DEVONO ESSERE INDICATI IN OGNI CASO, E DEI REQUISITI AGGIUNTIVI CHE DEVONO ESSERE INDICATI SE RICHIESTI.

REQUISITI DI BASE:

- ❑ RICHIESTA DI CONFORMITÀ ALLA UNI EN 206-1;
- ❑ CLASSE DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE;
- ❑ CLASSE DI RESISTENZA MINIMA A COMPRESSIONE;
- ❑ DIMENSIONE MASSIMA NOMINALE DELL'AGGREGATO;
- ❑ CLASSE DI CONSISTENZA (LAVORABILITÀ AL GETTO – VEDI TABELLA);
- ❑ CLASSE DI CONTENUTO IN CLORURI.

CLASSE	ABBASSAMENTO AL CONO
S1	10 ÷ 40 mm
S2	50 ÷ 90 mm
S3	100 ÷ 150 mm
S4	160 ÷ 210 mm
S5	≥ 220* mm

* E' consigliabile definire un limite superiore

IN AGGIUNTA, PER IL CALCESTRUZZO LEGGERO:

LA CLASSE DI MASSA VOLUMICA, O IL VALORE DI RIFERIMENTO PER LA MASSA VOLUMICA.

IN AGGIUNTA, PER IL CALCESTRUZZO PESANTE:

IL VALORE DI RIFERIMENTO PER LA MASSA VOLUMICA



REQUISITI AGGIUNTIVI:

- TIPI O CLASSI SPECIALI DI CEMENTO (ES. CEMENTO A BASSO CALORE DI IDRATAZIONE);
- TIPI O CLASSI SPECIALI DI AGGREGATO (ES. AGGREGATI NON GELIVI);
- CARATTERISTICHE RICHIESTE PER LA RESISTENZA AL GELO-DISGELO, PER ESEMPIO IL CONTENUTO DI ARIA;
- REQUISITI PER LA TEMPERATURA DEL CALCESTRUZZO FRESCO;
- SVILUPPO DELLA RESISTENZA (ES. STRUTTURA DA REALIZZARE E CARICARE A BREVI STAGIONATURE, INFERIORI A 28 GIORNI);
- SVILUPPO DI CALORE DURANTE L'IDRATAZIONE;
- PRESA RITARDATA;
- RESISTENZA ALLA PENETRAZIONE DELL'ACQUA;
- RESISTENZA ALL'ABRASIONE;
- RESISTENZA ALLA TRAZIONE INDIRETTA;
- ALTRI REQUISITI TECNICI (FINITURE PARTICOLARI – METODI SPECIALI DI MESSA IN OPERA)



TABELLE

CLASSE D'ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (kg/m ³)
XC1	0,60	C (25/30)	300
XC2	0,60	C (25/30)	300
XC3	0,55	C (28/35)	320
XC4	0,50	C (32/40)	340

Valori limite per il calcestruzzo in classe XC secondo il prospetto 4 della UNI 11104

CLASSE D'ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (kg/m ³)
XD1	0,55	C (28/35)	320
XD2	0,50	C (32/40)	340
XD3	0,45	C (35/45)	360

Valori limite per il calcestruzzo in classe XD secondo il prospetto 4 della UNI 11104

CLASSE D'ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (kg/m ³)
XS1	0,50	C (32/40)	340
XS2	0,45	C (35/45)	360
XS3	0,45	C (35/45)	360

Valori limite per il calcestruzzo in classe XS secondo il prospetto 4 della UNI 11104

CLASSE D'ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (kg/m ³)
XA1	0,55	C (28/35)	320
XA2	0,50	C (32/40)	340
XA3	0,45	C (35/45)	360

Valori limite per il calcestruzzo in classe XA secondo il prospetto 4 della UNI 11104

CLASSE D'ESPOSIZIONE	MASSIMO A/C	CLASSE DI RESISTENZA MINIMA	VOLUME MINIMO DI ARIA (%)	DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO (kg/m ³)	ALTRI REQUISITI
XF1	0,50	C (32/40)	---	320	Aggregati conformi alla UNI-EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo
XF2	0,50	C (25/30)	3	340	
XF3	0,50	C (25/30)	3	340	
XF4	0,45	C (28/35)	3	360	

Valori limite per il calcestruzzo in classe XF secondo il prospetto 4 della UNI 11104



DURABILITÀ DELLE STRUTTURE: Processo progettuale

DEFINIZIONE DELLA CLASSE DI VITA NOMINALE

(50 o 100 ANNI – D.M. 14/01/2008 - Eurocodici)



INDIVIDUAZIONE DELLE POSSIBILI FORME DI AGGRESSIONE DEL CALCESTRUZZO E DELL'ACCIAIO DI ARMATURA IN FUNZIONE DELL'AMBIENTE DI PROGETTO

(CARBONATAZIONE, ATTACCO DA CLORURI, CICLI DI GELO-DISGELO, ATTACCO CHIMICO)



DEFINIZIONE DELLE CLASSI DI ESPOSIZIONE AMBIENTALI E DEI REQUISITI PRESTAZIONALI MINIMI DEL CALCESTRUZZO

(Rck MINIMO – Prospetto 4 Norma UNI 11104)

INDIVIDUZIONE DEL COPRIFERRO MINIMO

(NORME UNI EN 206 - UNI 11104 - Eurocodici)



CALCOLI E VERIFICHE STRUTTURALI



PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

(CONFORMI ALLA UNI EN 206 - UNI 11104 – Linee Guida Progetto Concrete)



REALIZZAZIONE DELL'OPERA

(CONTROLLI OBBLIGATORI DA PARTE DEL DIRETTORE DEI LAVORI SUI MATERIALI E CERTIFICAZIONI DI ACCOMPAGNAMENTO
FPC CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO E QUALIFICAZIONE ACCIAIO DI ARMATURA)



COLLAUDO



Applicazioni

Per meglio comprendere l'applicazione reale della classificazione ambientale e conseguente prescrizione del calcestruzzo e dei copriferrì, si riporta l'esempio di tutto l'iter, con riferimento a un edificio con vita nominale di 50 anni secondo il D.M. 14/01/08.

L'edificio, destinato a civile abitazione, è realizzato in zona pianeggiante, ubicata nell'area urbana di una località del Nord Italia a quota 350 m s.l.m. ed è costituito da un piano pilotis, ulteriori quattro piani fuori terra, un sottotetto e un piano interrato. La configurazione in pianta (vedi figura 1) è un corpo unico compatto senza giunti di dilatazione, con simmetria longitudinale e trasversale.

La struttura d'elevazione è formata da telai di calcestruzzo armato gettati in opera. Gli elementi verticali sono costituiti da pilastri e vani ascensore, gli elementi orizzontali da travi in c.a. e solai misti in latero-cemento con soletta di completamento in calcestruzzo (al piano terreno, da predalles in calcestruzzo con alleggerimento in polistirolo).

Le fondazioni sono a plinti isolati di altezza 0,50 m con dimensioni in pianta adeguate alle caratteristiche meccaniche del terreno, definite in base ai risultati delle indagini geognostiche. Il piano interrato è chiuso da muri perimetrali di calcestruzzo armato, gettati contro cassero, aventi fondazione di altezza 0,35 m.

Dalle indagini sui terreni è stata individuata presenza di gesso (attacco solfatico) in quantità tale da rientrare in classe XA1.

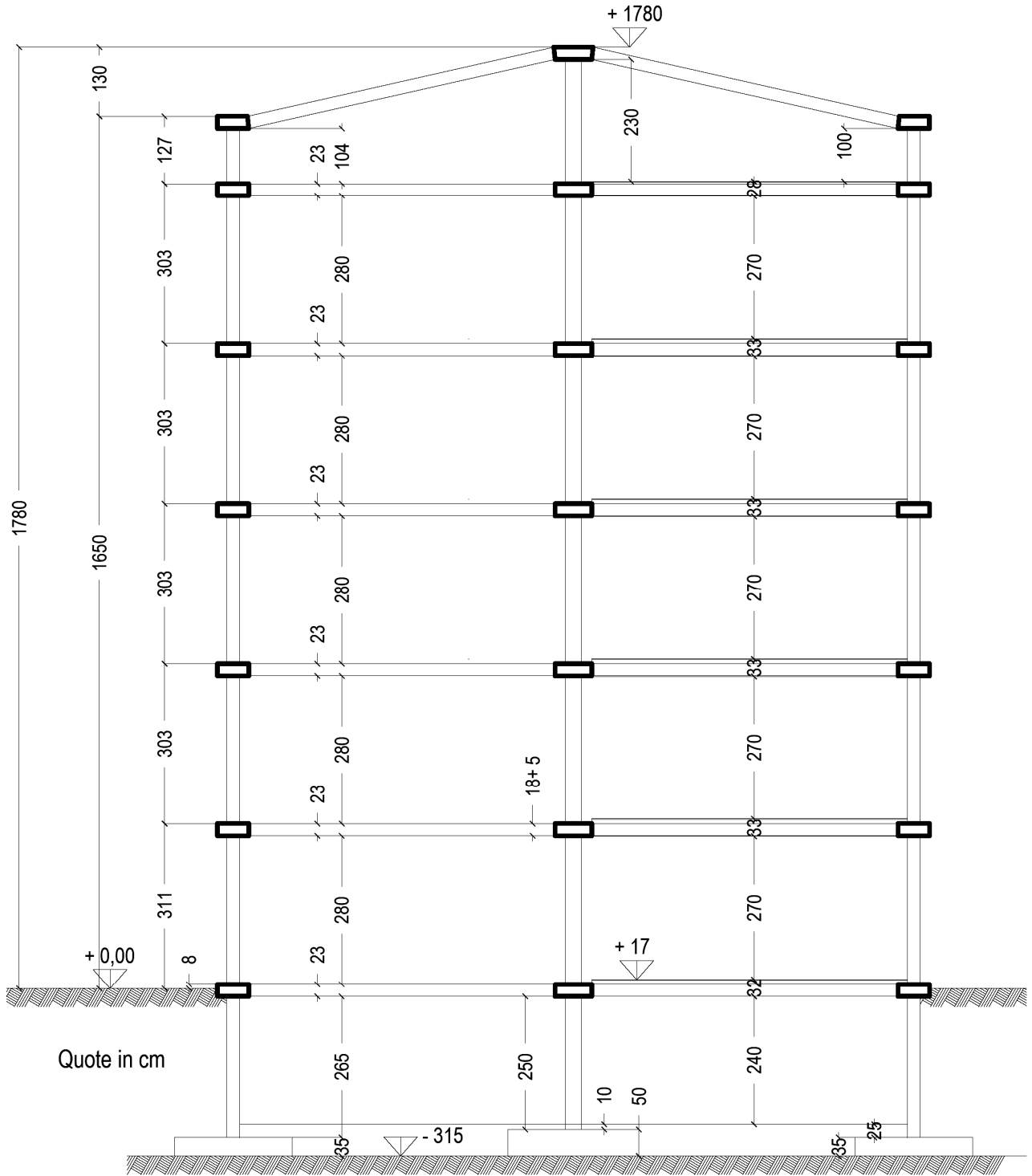


Fig. 1 – Sezione verticale dell'edificio



Per l'edificio vale la seguente classificazione delle aggressioni.

CLASSE D'ESPOSIZIONE	DESCRIZIONE AMBIENTE	PARTI DI STRUTTURA INTERESSATE
XC1	Interni di edifici con umidità relativa bassa	Strutture in elevazione, tranne il primo piano fuori terra ("piano pilotis")
XC2	Bagnato, raramente asciutto, strutture permanentemente immerse in liquidi o terreni non aggressivi	Fondazioni e muri contro terra
XC3	Umidità moderata al riparo dalla pioggia	Strutture del piano terreno ("piano pilotis")
XA1	Terreni o acque con aggressività di tipo chimico debole	Fondazioni e muri contro terra

Classificazione degli elementi strutturali secondo il prosp. 1 della UNI 11104

Per quanto riguarda il copriferro sono state fatte ipotesi sui diametri delle barre d'armatura che, per la tipologia d'opera in esame, non sono mai tali da far risultare più restrittivo il valore di $c_{min,b}$ rispetto a $c_{min,dur}$ (v. paragrafo sui copriferri). In base alle prescrizioni della UNI 11104 e dell'EC2 si ha il seguente prospetto.

PARTI DI STRUTTURA INTERESSATE	CLASSI D'ESPOSIZIONE	MAX A/C	CLASSE DI RESISTENZA MIN	DOSAGGIO MIN. CEMENTO (kg/m ³)	COPRIFERRO NOMINALE (mm)
Strutture in elevazione, tranne il primo piano F.T. ("piano pilotis")	XC1	0,60	C (25/30)	300	25
Fondazioni e muri contro terra	XC2 + XA1	0,55	C (28/35)	320	45
Strutture del piano terreno ("piano pilotis")	XC3	0,55	C (28/35)	320	35

Prescrizioni per i calcestruzzi secondo il prosp. 4 della UNI 11104 e l'EC2

Si nota come in un edificio multipiano di civile abitazione le tipologie di calcestruzzo siano essenzialmente due, solitamente una destinata alle fondazioni e l'altra alle strutture in elevazione. Nel caso in esame, comunque, il calcestruzzo destinato alle fondazioni viene utilizzato anche per il piano pilotis (piano terreno) in base alle richieste della norma.

Affinché la prescrizione sia completa occorre definire i requisiti aggiuntivi, quindi il diametro massimo dell'aggregato e la classe di consistenza.



La valutazione del diametro massimo dell'aggregato va condotta dopo aver definito compiutamente la geometria delle sezioni (in termini di spessori minimi dell'elemento strutturale e interferro minimo); poiché tale parametro governa l'omogeneità dell'impasto gettato in opera, un errore di prescrizione porterebbe al rischio di separazione degli elementi lapidei più grandi dal resto del conglomerato, con inevitabili ripercussioni sulle proprietà fisico-meccaniche dell'elemento strutturale (modulo elastico, resistenza, coefficiente di dilatazione termica lineare, modulo di Poisson) e sulla durabilità.

La definizione della classe di consistenza si opera in funzione della maggiore o minore lavorabilità richiesta per la tipologia di elemento strutturale (o gruppo di elementi).

Tendenzialmente per elementi verticali come i muri contro terra, i plinti di fondazione, i vani ascensore e i pilastri, dovendo utilizzare un'autopompa, è necessario selezionare una classe di consistenza pari ad S4 (abb. al cono = 160÷210 mm). La maggiore difficoltà di posa che caratterizza elementi orizzontali come travi e solai, accoppiata al fatto di non poter conoscere con precisione le caratteristiche del clima legate al periodo dell'anno in cui si realizzerà il getto, porta all'inevitabile scelta di una classe S5 (abb. al cono > 210 mm). Stanti le difficoltà di messa in opera di un calcestruzzo ad elevata fluidità in strutture inclinate, per le rampe scale e le falde di copertura viene prescelta una classe S3 (abb. al cono = 100÷150 mm), chiaramente da gettare mediante secchione.

Da non dimenticare, infine, che le differenti lavorabilità implicano altresì diverse tempistiche di vibrazione meccanica, al fine di ottenere il medesimo grado di compattazione in tutto il complesso strutturale.