



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
Servizio Tecnico Centrale

Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale
e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del
calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive.

Febbraio 2008

INDICE

- Presentazione
- 1 Campo d'applicazione
- 2 Definizioni
- 3 Specifiche progettuali e di capitolato
- 4 Verifiche ed operazioni preliminari alla messa in opera del calcestruzzo
 - 4.1 Casseforme
 - 4.2 Strutture di supporto
 - 4.3 Barre d'armatura
 - 4.3.1 Assemblaggio e messa in opera delle armature
 - 4.3.2 Giunzioni
- 5 Trasporto, messa in opera e compattazione del calcestruzzo
 - 5.1 Trasporto del calcestruzzo fresco
 - 5.2 Calcestruzzo fresco a piè d'opera
 - 5.3 Controllo della resistenza alla compressione
 - 5.4 Messa in opera del calcestruzzo
 - 5.4.1 Movimentazione del calcestruzzo
 - 5.4.1.1 Movimentazione mediante canaletta
 - 5.4.1.2 Movimentazione con benna
 - 5.4.1.3 Movimentazione con nastri trasportatori
 - 5.4.1.4 Movimentazione mediante pompa
 - 5.4.2 Operazioni di getto
 - 5.4.2.1 Scarico del calcestruzzo ordinario
 - 5.4.2.2 Scarico del calcestruzzo autocompattante (SCC)
 - 5.4.3 Riprese di getto
 - 5.5 Compattazione del calcestruzzo
 - 5.5.1 Compattazione mediante vibrazione
 - 5.5.2 Difetti indotti dalla vibrazione impropria
 - 5.6 Calcestruzzo proiettato
 - 5.7 Fessurazione del calcestruzzo in fase plastica
 - 5.7.1 Assestamento plastico
 - 5.7.2 Ritiro plastico
- 6 Stagionatura e protezione del calcestruzzo
 - 6.1 Getti in clima freddo
 - 6.2 Getti in clima caldo
 - 6.3 Sviluppo di calore: getti di massa
 - 6.4 Protezione termica durante la stagionatura
 - 6.5 Durata della stagionatura
 - 6.6 Prescrizioni per una corretta stagionatura
- 7 Disarmo
- 8 Difetti superficiali, cause e rimedi
- 9 Difetti fessurativi, cause e rimedi

- 10 Controllo del calcestruzzo in opera
 - 10.1 Pianificazione delle prove in opera
 - 10.2 Predisposizione delle aree di prova
 - 10.3 Elaborazione dei risultati
- 11 Rilievo delle caratteristiche del calcestruzzo in opera mediante carotaggio
 - 11.1 Prelievo di campioni mediante carotaggio
 - 11.2 Osservazioni circa la stima della resistenza meccanica in situ ottenuta su provini estratti per carotaggio
 - 11.3 Microcarotaggio e sua applicabilità
- 12 Metodi indiretti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera
 - 12.1 Generalità
 - 12.2 Taratura delle curve di correlazione tra risultati di prove non distruttive e resistenza meccanica
 - 12.3 Limiti e precauzioni nell'applicazione dei metodi indiretti di valutazione della resistenza meccanica
 - 12.4 Stima delle caratteristiche meccaniche opera mediante l'indice di rimbalzo (o sclerometrico)
 - 12.4.1 Principio di funzionamento
 - 12.4.2 Taratura dello strumento
 - 12.4.3 Modalità di esecuzione
 - 12.4.4 Elaborazione delle misure
 - 12.5 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera mediante la velocità di propagazione di micro-impulsi (ultrasonici)
 - 12.5.1 Principio di funzionamento
 - 12.5.2 Taratura dello strumento
 - 12.5.3 Modalità d'esecuzione
 - 12.5.4 Elaborazione delle misure
 - 12.6 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla forza di estrazione (pull-out)
 - 12.6.1 Principio di funzionamento
 - 12.6.2 Taratura della strumentazione
 - 12.6.3 Modalità di esecuzione
 - 12.6.4 Elaborazione delle misure
 - 12.7 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla profondità di penetrazione di sonde
 - 12.7.1 Principio di funzionamento
 - 12.7.2 Taratura della strumentazione
 - 12.7.3 Modalità d'esecuzione
 - 12.7.4 Elaborazione delle misure
 - 12.8 Stima delle caratteristiche meccaniche mediante l'impiego di metodi combinati
 - 12.9 Determinazione d'altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro

- 12.9.1 Principio di funzionamento
- 12.9.2 Taratura della strumentazione
- 12.10 Determinazione d'altre proprietà del calcestruzzo in opera: profondità di carbonatazione
 - 12.10.1 Principio
 - 12.10.2 Modalità di esecuzione
- 12.11 Valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in sito
- 12.12 Ulteriori indagini strumentali sul calcestruzzo in opera

Generalità

Nel contesto di un'azione normativa tesa a migliorare la sicurezza strutturale, nonché l'affidabilità dei materiali e dei relativi sistemi costruttivi non poteva mancare una Linea guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale e sulla valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive. Il documento ha l'obiettivo di evitare errori riconducibili a procedure improprie che possono pregiudicare le attese, in termini di resistenza e di durabilità, alla base del progetto nonché errori derivanti da inappropriata interpretazione dei risultati delle prove non distruttive.

Nella prima parte il documento illustra ed esamina l'insieme delle lavorazioni e dei processi finalizzati ad una corretta messa in opera intendendo con tale accezione l'insieme delle specifiche operazioni di movimentazione, getto, compattazione e stagionatura atte a realizzare un calcestruzzo strutturale con le caratteristiche di resistenza e di durabilità previste in progetto.

Nella seconda parte, sono illustrati i sistemi di valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante prove non distruttive; valutazione effettuata sia con metodi diretti (carotaggio) che con metodi indiretti (metodo sclerometrico, metodo a ultrasuoni, metodo basato sulla forza di estrazione di inserti o pull-out e metodo basato sulla profondità di penetrazione di sonde). Sono altresì indicati, per ogni metodo, i relativi principi di funzionamento, la taratura della strumentazione utilizzata, le modalità di esecuzione delle prove, nonché l'idonea elaborazione delle misure, per la quale sono necessarie appropriate curve di correlazione. Nello spirito di fornire agli operatori del settore uno strumento conoscitivo e operativo il più possibile organico, funzionale, corretto sotto il profilo tecnico-scientifico, sono stati evidenziati i limiti e le precauzioni nell'applicazione di ciascuno dei metodi indiretti per la valutazione della resistenza meccanica in situ che, a volte, nell'uso corrente, viene affidata a generici grafici di correlazione forniti dal fabbricante a corredo delle apparecchiature di prova. Al riguardo, si richiama l'attenzione sul paragrafo relativo alle prescrizioni generali per il collaudo statico che tra gli accertamenti discrezionali "utili per formarsi il convincimento della sicurezza di un'opera" cita il ricorso alle prove non distruttive.

Il documento proposto tocca, quindi, aspetti fondamentali per la sicurezza statica delle opere, (con l'obiettivo anche di evitare un certo "analfabetismo di ritorno") nella utilizzazione di un materiale versatile e, per questo, a volte manipolato con eccessiva confidenza trascurando i necessari accorgimenti.

Le Linee guida sono documenti tecnici a carattere monografico con finalità informative e divulgative che concretizzano altresì un'azione normativa di indirizzo, sviluppata su contenuti tecnico-scientifici, di indubbio ausilio a progettisti ed operatori del settore delle costruzioni. Per queste caratteristiche esse si inseriscono perfettamente nella finalità di qualificazione "dei soggetti esecutori di opere, dei prodotti, processi e servizi e dei sistemi di qualità impiegati dai soggetti stessi", sancita dall'art. 40 del Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture.

Sulla stessa linea di principio, sia la nota Direttiva europea 89/106 che le più recenti nuove Norme tecniche di settore, richiedono esplicitamente che tutti i materiali impiegati in un'opera siano:

- qualificati;
- controllati;
- accettati.

L'azione divulgatrice delle linee guida in questione assume poi particolare importanza se si tiene conto dell'innovativo indirizzo "prestazionale" assunto dalle più recenti normative tecniche. Come è noto, una norma prestazionale fissa gli obiettivi ovvero i requisiti finali dell'opera, lasciando maggiore spazio e responsabilità alle figure professionali incaricate della progettazione e realizzazione dell'opera.

La presente Linea guida assume una specifica rilevanza per il settore delle costruzioni del nostro Paese, anche in relazione al recupero del patrimonio edilizio che rappresenta un fattore prioritario. In tale ottica appare di particolare utilità la risposta che il documento dà alle esigenze di valutazione della sicurezza e di adeguamento delle strutture esistenti poste dalla nuova classificazione sismica che, di fatto, considera soggetto a sismicità tutto il territorio nazionale.

1 Campo d'applicazione

Le presenti Linee Guida si applicano prevalentemente al calcestruzzo per usi strutturali, armato e non, ordinario e precompresso, usualmente impiegato nelle costruzioni. Restano comunque valide talune disposizioni, laddove applicabili, ai numerosi altri tipi di calcestruzzo conosciuti ed utilizzati – che potranno essere oggetto di future specifiche Linee Guida - quali ad esempio: calcestruzzo leggero, calcestruzzo ad alta resistenza, calcestruzzo additivato, calcestruzzo plastico, SCC, gunite, etc...

2 Definizioni

boiaccia

miscela fluida di cemento ed acqua.

carbonatazione

neutralizzazione dell'idrossido di calcio presente nel calcestruzzo indurito per effetto dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera.

coesività

proprietà del calcestruzzo fresco di resistere alla segregazione.

compattazione

azione dinamica applicata al calcestruzzo nel corso della messa in opera, finalizzata a minimizzare il contenuto d'aria intrappolata.

consistenza

proprietà del calcestruzzo fresco connessa con la facilità di messa in opera e di compattazione, può essere espressa in termini di cedimento al cono, di spandimento, ...

copriferro

nel calcestruzzo armato è la distanza minima tra la superficie del ferro di armatura e la superficie esterna del calcestruzzo.

curing

azione od agente esterno utilizzato per proteggere il calcestruzzo durante la maturazione.

disarmante

olio od agente che, applicato al manto della cassaforma, agevola il distacco tra cassaforma e calcestruzzo dopo l'indurimento.

disarmo

azione di rimozione delle casseforme dopo che il calcestruzzo ha raggiunto la resistenza meccanica prevista.

durabilità

capacità del calcestruzzo di conservare, per un prefissato periodo di tempo, le sue caratteristiche nelle condizioni ambientali di esposizione.

esotermico

processo o reazione chimica accompagnata da sviluppo di calore; un esempio è l'idratazione del cemento.

essudazione (o bleeding)

affioramento sulla superficie del calcestruzzo fresco di acqua di impasto o boiaccia, dovuto ad un eccesso di acqua o a carenza di particelle fini nella miscela.

finitura (delle superfici)

aspetto della superficie del calcestruzzo .

galvanizzato

detto di elemento metallico che ha subito un riporto elettrochimico di metallo protettivo (es.: zincatura).

giunto freddo

ripresa di getto senza aderenza, eseguita su calcestruzzo indurito evidenziata da fessura o cavillatura.

incrudito (acciaio incrudito)

trattamento dell'acciaio che provoca un aumento della resistenza a scapito della plasticità.

indurimento (del calcestruzzo)

processo durante il quale il conglomerato, dopo la presa, acquisisce gradatamente la resistenza meccanica finale.

Interferro

distanza minima tra le superfici esterne di due ferri inglobati in una struttura di calcestruzzo.

massa volumica

massa dell'unità di volume (anche densità).

maturazione

tempo, processo e condizioni che regolano l'indurimento del calcestruzzo.

monoliticità

capacità di getti successivi di aderire ed integrarsi tra loro formando un insieme continuo ed omogeneo.

nido di ghiaia

porzione di getto in cui gli aggregati grossi si presentano sciolti e/o con presenza di cavità, le particelle grosse dell'aggregato possono essere ricoperte parzialmente da boiacca cementizia.

organismo strutturale

insieme delle strutture componenti un corpo di fabbrica.

permeabilità (del calcestruzzo)

proprietà connessa con la penetrazione di acqua o gas attraverso il calcestruzzo indurito.

prelievo

azione di estrazione di un campione di calcestruzzo (fresco od indurito) su cui eseguire prove e/o determinazioni

prestazione

caratteristica oggetto di specifica richiesta (es.: consistenza, diametro massimo dell'aggregato, resistenza caratteristica, ...).

reologia

studia lo scorrimento di materiali fluidi o a loro assimilabili e le relazioni che intercorrono tra sforzi, deformazioni e tempo. Nel calcestruzzo fresco le caratteristiche reologiche sono valutate in termini di consistenza.

ripresa di getto

prosecuzione delle operazioni di messa in opera del calcestruzzo a contatto con una parte che può essere anche indurita. Linea di separazione tra getti consecutivi effettuati in tempi diversi.

riscontro

elemento che consente la verifica dell'allineamento tra parti contigue.

ritiro plastico

contrazione del calcestruzzo nel corso del primo periodo di indurimento provocata dalla perdita anche parziale dell'acqua di impasto

SCC (calcestruzzo autocompattante)

calcestruzzo che si compatta, anche in casseforme complesse, per effetto del solo peso proprio senza apporto di energia esterna (vibrazione), caratterizzato da elevata coesività

scorrevolezza (del calcestruzzo)

caratteristica del calcestruzzo che riguarda la capacità di fluire all'interno delle casseforme.

sedimentazione (del calcestruzzo)

separazione dei solidi sospesi entro lo spessore di un getto.

segregazione

separazione dei componenti il calcestruzzo nel corso della movimentazione o messa in opera

stagionatura

insieme delle azioni attivate al fine di consentire la corretta maturazione del calcestruzzo.

vibrazione (v. compattazione)

3 Specifiche progettuali e di capitolato

La documentazione necessaria alla realizzazione di un'opera in calcestruzzo deve comprendere generalmente:

- la relazione di calcolo relativa alle singole parti della struttura (elementi, vincoli, ecc.) e all'intero organismo strutturale;
- la documentazione di progetto costituita da:
 - a] la Relazione Tecnica che contenga una dettagliata descrizione delle opere, accompagnata dai relativi elaborati grafici in cui siano esplicitate le informazioni riguardanti la geometria dell'organismo strutturale e delle sue parti, la quantità e la posizione delle armature, eventuali fori ed inserti, le tolleranze e le prescrizioni relative alle superfici, e, per gli elementi prefabbricati, i dispositivi di stoccaggio, trasporto e movimentazione, nonché i magisteri di impiego in opera (modalità di montaggio, armature di unione con getti successivi, ecc.);
 - b] la descrizione dei materiali e/o componenti con le relative specifiche, i controlli, la loro frequenza e le rispettive norme di riferimento; queste informazioni devono essere riportate in forma sintetica negli elaborati grafici [a] e in forma dettagliata ed esaustiva nel Capitolato tecnico [c];
 - c] la descrizione delle opere contenente: tutte le indicazioni necessarie alla messa in opera e all'esecuzione, con particolare riferimento a materiali e/o componenti di impiego inusuale o innovativi; le procedure e le sequenze per le lavorazioni successive, nonché le istruzioni per il collaudo in corso d'opera. La redazione di prescrizioni di capitolato tecnico dettagliate, la loro applicazione e relativa sorveglianza, hanno una forte incidenza sulla riuscita di opere affidabili e durevoli.

4 Verifiche ed operazioni preliminari alla messa in opera del calcestruzzo

Prima di iniziare la messa in opera del calcestruzzo è necessario compiere le operazioni e verifiche riguardanti almeno: le casseforme, le strutture di supporto e le armature metalliche.

4.1 Casseforme

Le casseforme e le relative strutture di supporto devono essere progettate e realizzate in modo da sopportare le azioni alle quali sono sottoposte nel corso della messa in opera del

calcestruzzo e da essere abbastanza rigide per garantire il rispetto delle dimensioni geometriche e delle tolleranze previste.

In base alla loro configurazione le casseforme possono essere classificate in:

- casseforme smontabili,
- casseforme a tunnel, idonee a realizzare contemporaneamente elementi edilizi orizzontali e verticali,
- casseforme rampanti, atte a realizzare strutture verticali mediante il loro progressivo innalzamento, ancorate al calcestruzzo precedentemente messo in opera,
- casseforme scorrevoli, predisposte per realizzare in modo continuo opere che si sviluppano in altezza o lunghezza.

Per rispettare le quote e le tolleranze geometriche progettuali, le casseforme devono essere praticamente indeformabili quando, nel corso della messa in opera, sono assoggettate alla pressione del calcestruzzo ed alla vibrazione. È opportuno che eventuali prescrizioni relative al grado di finitura della superficie a vista siano riportate nelle specifiche progettuali.

La superficie interna delle casseforme rappresenta il negativo dell'opera da realizzare, tutti i suoi pregi e difetti si ritrovano sulla superficie del getto.

Generalmente una cassaforma è ottenuta mediante l'accostamento di pannelli, se tale operazione non è eseguita correttamente e/o non sono predisposti i giunti a tenuta, la fase liquida del calcestruzzo, o boiaccia, fuoriesce provocando difetti estetici sulla superficie del getto, eterogeneità nella tessitura e nella colorazione, nonché nidi di ghiaia. La tenuta delle casseforme deve essere curata in modo particolare nelle strutture con superfici di calcestruzzo a vista, può essere migliorata utilizzando giunti preformati riutilizzabili o con mastice e con guarnizioni monouso.

Alla difficoltà di ottenere connessioni perfette si può porre rimedio facendo in modo che le giunture siano in corrispondenza di modanature o di altri punti d'arresto del getto.

Tutti i tipi di casseforme (con la sola esclusione di quelle che rimangono inglobate nell'opera finita), prima della messa in opera del calcestruzzo, richiedono il trattamento con un agente (prodotto) disarmante.

I prodotti disarmanti sono applicati ai manti delle casseforme per agevolare il distacco del calcestruzzo, ma svolgono anche altre funzioni quali: la protezione della superficie delle casseforme metalliche dall'ossidazione e della corrosione, l'impermeabilizzazione dei pannelli di legno, il miglioramento della qualità della superficie del calcestruzzo. La scelta del prodotto e la sua corretta applicazione influenzano la qualità delle superfici del calcestruzzo, in particolare: l'omogeneità di colore e l'assenza di bolle.

Le casseforme assorbenti, costituite da tavole o pannelli di legno non trattato od altri materiali assorbenti, calcestruzzo compreso, prima della messa in opera del calcestruzzo richiedono la saturazione con acqua. Si deve aver cura di eliminare ogni significativa traccia di ruggine nelle casseforme metalliche.

Nel caso in cui i ferri d'armatura non siano vincolati alle casseforme, per rispettare le tolleranze dello spessore del copriferro, si dovranno predisporre opportune guide o riscontri che contrastano l'effetto della pressione esercitata dal calcestruzzo.

Nel quadro sottostante sono indicati i principali difetti delle casseforme, le conseguenze e le possibili precauzioni per evitare, o almeno contenere i difetti stessi.

Tabella 4-1: difetti delle casseforme, conseguenze e precauzioni

Difetti	Conseguenze	Precauzioni
<i>Per le casseforme</i>		
Deformabilità eccessiva	Sulle tolleranze dimensionali.	Utilizzare casseforme poco deformabili, casseforme non deformate, pannelli di spessore omogeneo.
Tenuta insufficiente	Perdita di boiaccia e/o fuoriuscita d'acqua d'impasto. Formazione di nidi di ghiaia.	Connettere correttamente le casseforme. Sigillare i giunti con materiali idonei o guarnizioni.
<i>Per i pannelli</i>		
Superficie troppo assorbente	Superficie del calcestruzzo di colore chiara ed omogenea.	Saturare le casseforme con acqua. Usare un idoneo prodotto disarmante e/o impermeabilizzante.
Superficie non assorbente	Presenza di bolle superficiali	Distribuire correttamente il disarmante. Far rifluire il calcestruzzo dal basso
Superficie ossidata	Tracce di macchie e di ruggine.	Pulire accuratamente le casseforme metalliche. Utilizzare un prodotto disarmante anticorrosivo.
<i>Per i prodotti disarmanti</i>		
Distribuzione in eccesso	Macchie sul calcestruzzo. Presenza di bolle d'aria.	Utilizzare un sistema idoneo a distribuire in modo omogeneo un film sottile di disarmante. Pulire accuratamente le casseforme dai residui dei precedenti impieghi.
Distribuzione insufficiente	Disomogeneità nel distacco	Curare l'applicazione e l'applicazione del prodotto disarmante.

Fra le casseforme speciali sono frequentemente utilizzate quelle rampanti e quelle scorrevoli orizzontali e verticali.

Le casseforme rampanti si sorreggono sul calcestruzzo indurito dei getti sottostanti precedentemente messi in opera. Il loro fissaggio è realizzato mediante bulloni o barre inserite nel calcestruzzo. L'avanzamento nei getti è vincolato al raggiungimento, da parte del calcestruzzo, di una resistenza sufficiente a sostenere il carico delle armature, del calcestruzzo del successivo getto, degli uomini e delle attrezzature.

Questa tecnica è finalizzata alla realizzazione di strutture di notevole altezza quali: pile di ponte, ciminiera, pareti di sbarramento (dighe), strutture industriali a sviluppo verticale.

La tecnica delle casseforme scorrevoli consente di mettere in opera il calcestruzzo in modo continuo. La velocità di avanzamento della cassaforma è regolata in modo che il calcestruzzo formato sia sufficientemente rigido da mantenere la propria forma, sostenere il proprio peso e le eventuali sollecitazioni indotte dalle attrezzature e, nel caso di casseforme scorrevoli verticali, anche il calcestruzzo del getto successivo.

Le casseforme scorrevole orizzontale, scivolano conferendo al calcestruzzo la sezione voluta; inoltre, avanza su rotaie, e la direzione e l'allineamento sono mantenuti facendo riferimento ad un filo di guida. Sono utilizzate ad esempio per rivestimenti di gallerie, condotte d'acqua, rivestimenti di canali, pavimentazioni stradali, barriere spartitraffico.

Le casseforme scorrevoli verticali sono utilizzate per realizzare strutture quali: sili, edifici a torre, ciminiera.

L'utilizzo delle casseforme scorrevoli comporta dei vincoli per le proprietà del calcestruzzo fresco; nel caso delle casseforme scorrevoli orizzontali è richiesta una consistenza quasi asciutta (S1-S2); il calcestruzzo deve rendersi plastico sotto l'effetto dei vibratorii, ma al rilascio dello stampo deve essere sufficientemente rigido per autosostenersi. Con le casseforme scorrevoli verticali, invece, il tempo d'indurimento e la scorrevolezza del calcestruzzo sono parametri vincolanti e devono essere costantemente controllati.

Gli eventuali fori e/o nicchie formate nel calcestruzzo dalle strutture di supporto dei casseri devono essere riempiti e trattati in superficie con un materiale di qualità simile a quella del calcestruzzo circostante.

Gli inserti destinati a mantenere le armature in posizione, quali distanziali, tiranti, barre o altri elementi incorporati o annegati nella sezione come placche e perni di ancoraggio, devono:

- essere fissati solidamente in modo tale che la loro posizione rimanga quella prescritta anche dopo la messa in opera e la compattazione del calcestruzzo;
- non indebolire la struttura;
- non indurre effetti dannosi al calcestruzzo, agli acciai di armatura e ai tiranti di precompressione;
- non provocare macchie inaccettabili;
- non nuocere alla funzionalità o alla durabilità dell'elemento strutturale;
- non ostacolare la messa in opera e la compattazione del calcestruzzo.

Ogni elemento annegato deve avere una rigidità tale da mantenere la sua forma durante le operazioni di messa in opera del calcestruzzo.

4.2 Strutture di supporto

Il progetto delle strutture di supporto deve prendere in considerazione l'effetto combinato:

- del peso proprio delle casseforme, dei ferri d'armatura e del calcestruzzo,
- della pressione esercitata sulle casseforme dal calcestruzzo in relazione ai suoi gradi di consistenza più elevati, particolarmente nel caso di calcestruzzo autocompattante (SCC) ;
- delle sollecitazioni esercitate da: personale, materiali, attrezzature, ecc., compresi gli effetti statici e dinamici provocati dalla messa in opera del calcestruzzo, dai suoi eventuali accumuli in fase di getto e dalla sua compattazione;
- dei possibili sovraccarichi dovuti al vento ed alla neve.

Salvo che per specifiche previsioni progettuali, alle casseforme non devono essere connessi carichi e/o azioni dinamiche dovute a fattori esterni quali, ad esempio, le tubazioni delle pompe per calcestruzzo. La deformazione totale delle casseforme, la somma di quelle relative ai pannelli e alle strutture di supporto, non deve superare le tolleranze geometriche previste per il getto.

Qualora apposite istruzioni al riguardo non siano espressamente contenute nel Capitolato tecnico, è opportuno sia predisposto un documento in cui raccogliere le indicazioni necessarie al montaggio ed allo smontaggio delle strutture di supporto, alla loro movimentazione e regolazione, nonché le informazioni circa il comportamento sotto carico ed i carichi massimi sopportabili.

Per evitare la deformazione del calcestruzzo non ancora completamente indurito e le possibili fessurazioni, lo studio progettuale delle strutture di supporto deve prevedere l'effetto della spinta verticale ed orizzontale del calcestruzzo durante la messa in opera e, nel caso in cui la struttura di supporto poggi, anche parzialmente, al suolo, occorrerà assumere i provvedimenti necessari per compensare gli eventuali assestamenti.

Le sollecitazioni verticali sono provocate da carichi statici e mobili. I carichi statici sono: il peso delle casseforme, delle armature metalliche e del calcestruzzo mentre i carichi mobili (verticali) sono provocati dal transito degli operatori, delle attrezzature, dei materiali, dei loro eventuali accumuli, ed eventuali attrezzature di cantiere.

La pressione laterale è esercitata sulle casseforme dal calcestruzzo fresco. Le casseforme devono essere progettate in modo da sopportare la pressione idrostatica:

$$p = w \cdot h \quad [a]$$

dove:

p = pressione laterale (kN/m²)

w = (densità) massa volumica del calcestruzzo fresco (kN/m³)

h = altezza del calcestruzzo allo stato fresco o plastico misurato a partire dalla sommità del getto (m).

A seguito del progressivo indurimento del calcestruzzo, la pressione laterale si riduce gradatamente nel tempo e di questo si può tener conto nel progetto delle casseforme di pareti e colonne. Nei diagrammi di figura 4-1, 4-2, 4-3 è illustrato come si possono stimare la pressione del calcestruzzo fresco P_b e la corrispettiva altezza di pressione idrostatica h_s in funzione della velocità di innalzamento del getto e della consistenza del calcestruzzo.

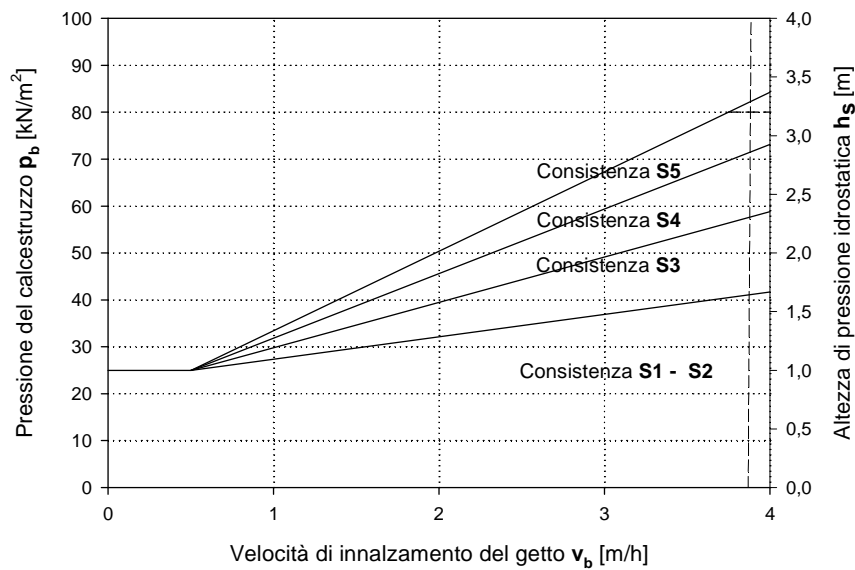
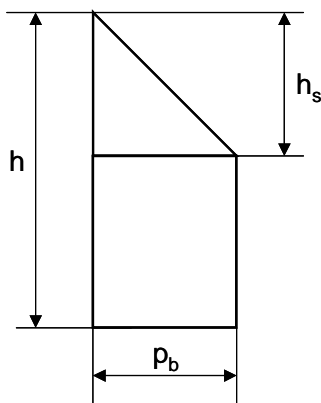
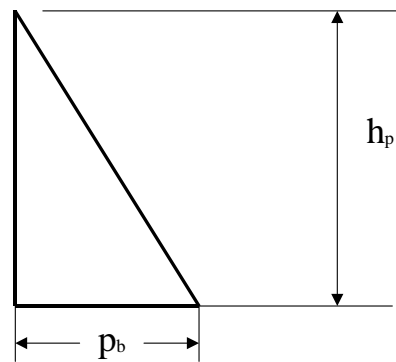


Figura 4-1: Diagramma per il calcolo della pressione del calcestruzzo e dell'altezza di pressione idrostatica valido per peso unitario del calcestruzzo = 25 kN/m³, tempo di fine presa inferiore a 5 ore, temperatura del calcestruzzo 15 (±1) °C.



per: $h \leq h_s$ $p = w h$
per: $h_s < h \leq h_p$ $p = p_b = w h_s$



per $h \leq h_p$ $p = w h$
(h_p = altezza del getto)

Figura 4-2: andamento della pressione laterale esercitata sulle casseforme da un calcestruzzo ordinario Figura 4-3: andamento della pressione laterale esercitata sulle casseforme da un calcestruzzo autocompattante (SCC)

La spinta idrostatica $p_b = w h$ è la massima pressione che il calcestruzzo fresco va ad esercitare.

Entro il campo di temperature ammesse per il calcestruzzo, prima della messa in opera, (5 ÷ 30°C) si può prevedere l'effetto della temperatura sul tempo di presa: se la temperatura è maggiore di 15°C (ma inferiore a 35°C) per ogni grado di differenza in più la pressione p_b e l'altezza idrostatica h_s possono essere ridotti del 3% fino ad un massimo del 30%,

mentre se la temperatura è minore di 15°C (ma maggiore di 5°C) la pressione p_b e l'altezza idrostatica h_s possono essere aumentati del 3% per ogni grado di differenza. L'uso di additivo ritardante di presa comporta un aumento della pressione del calcestruzzo fresco p_b e della rispettiva h_s ai fini del calcolo la maggiorazione può essere calcolata in base al diagramma di figura 4-4.

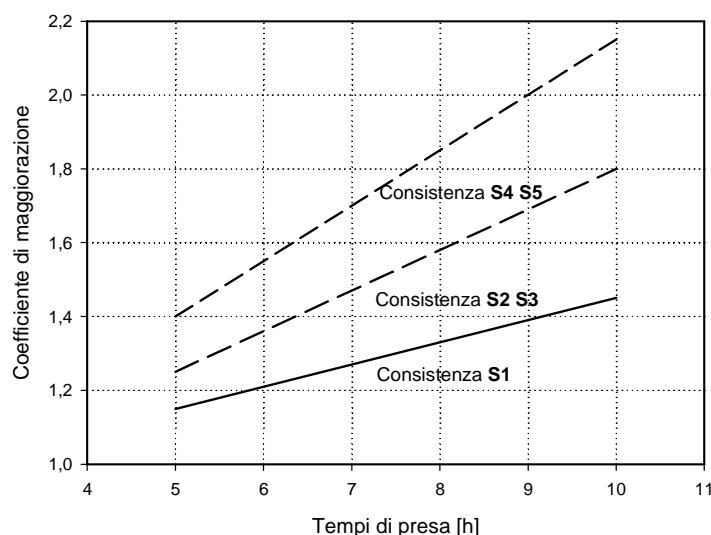


Figura 4-4: Coefficiente di maggiorazione della pressione e della altezza di pressione per effetto dell'aggiunta di additivi ritardanti di presa.

Se la massa volumica del calcestruzzo fresco si discosta dal valore convenzionale di 25 kN/m³ la pressione p_b , letta sul diagramma di figura 4-1, deve essere modificata moltiplicandola per $\alpha = 0.04 \cdot \gamma_b$, dove γ_b è la massa volumica effettiva del calcestruzzo fresco. L'altezza di pressione idrostatica h_s non varia al variare del peso specifico del calcestruzzo.

Nel caso del calcestruzzo autocompattante (SCC) non è prudente tener conto della riduzione di pressione laterale, che deve essere considerata di tipo idrostatico agente su tutta l'altezza di getto computata a partire dalla quota d'inizio o di ripresa di getto.

Per evitare la marcatura delle riprese di getto, compatibilmente con la capacità delle casseforme a resistere alla spinta idrostatica esercitata dal materiale fluido, il calcestruzzo autocompattante deve essere messo in opera in modo continuo programmando le riprese di getto lungo le linee di demarcazione architettoniche (modanature, segna-piano, ...)

4.3 Barre d'armatura

L'acciaio da calcestruzzo armato deve essere qualificato secondo le procedure riportate nelle "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche".

L'acciaio per calcestruzzo armato normalmente è fornito sotto forma di:

- barre
- rotoli
- reti e tralicci elettrosaldati.

Tutti gli acciai devono essere ad aderenza migliorata, e tutte le forniture devono essere accompagnate dalla “dichiarazione di conformità” qualora sussista l’obbligo della Marcatura CE ai sensi del DPR 21/04/1993 n. 246; laddove tale obbligo non sussista, le forniture di acciaio devono essere accompagnate dall’attestato di qualificazione del Servizio Tecnico Centrale.

I dispositivi di raccordo e di ancoraggio devono essere conformi alle norme vigenti. La superficie delle armature deve essere esente da ruggine e da sostanze che possono deteriorare le proprietà dell'acciaio o del calcestruzzo o l'aderenza fra loro.

Per evitare i possibili danni indotti dall’ossidazione dei ferri ordinari d’armatura possono essere utilizzate barre d’armatura in acciaio inossidabile, barre protette con zincatura (galvanizzate) o ricoperte con uno strato di vernice protettiva.

E’ opportuno che i trattamenti di zincatura e protezione mediante verniciatura siano applicati sulle barre (ed eventuali inserti) già piegate e preferibilmente assemblate. La movimentazione delle armature trattate richiede particolare cura poiché eventuali scalfitture del trattamento comprometterebbero l’effetto protettivo.

Il taglio e la curvatura dei ferri d’armatura devono essere effettuati secondo le prescrizioni riportate nella documentazione progettuale. E’ sempre comunque opportuno che:

- la curvatura sia effettuata con progressione regolare;
- la curvatura a temperatura inferiore a 5°C sia autorizzata dalla Direzione Lavori, che fisserà le eventuali precauzioni;
- a meno di una specifica indicazione riportata nella documentazione progettuale, sia evitato il riscaldamento delle barre per facilitarne la curvatura.

Le barre piegate devono presentare, nelle piegature, un raccordo circolare di raggio adeguato al diametro, i diametri dei mandrini di curvatura devono essere adattati al tipo d’armatura, e non devono essere inferiori ai valori indicati dalla normativa di settore.

4.3.1 Assemblaggio e messa in opera delle armature

Le armature devono essere messe in opera secondo le posizioni, le prescrizioni e le indicazioni dei disegni e dei documenti progettuali. In tal senso è opportuno che il progetto contenga un apposito elaborato riportante la distinta dei ferri di armatura.

Devono inoltre essere rispettate:

- le tolleranze di posizionamento definite nella documentazione progettuale
- lo spessore del copriferro specificato.

Allo scopo, come già accennato, è opportuno utilizzare adeguati calibri o spessori. I distanziali in acciaio, a contatto con la superficie esterna, del calcestruzzo sono ammessi solamente in classe di esposizione XO (UNI EN 206-1), (ambiente secco e riparato). Tale restrizione non si applica ai distanziali in acciaio inossidabile idoneo alle specifiche condizioni di esposizione.

Il copriferro è la distanza tra le superfici dell’armatura metallica più esterna comprensiva di legature e la superficie esterna più prossima del calcestruzzo. Il copriferro nominale specificato nei disegni, è definito da un valore minimo c_{min} cui deve essere aggiunto, in sede progettuale, un incremento Δh per tener conto della tolleranza. Se in superficie è

inserita una speciale armatura di rinforzo, anche questa deve soddisfare i requisiti dello spessore minimo.

4.3.2 Giunzioni

Le giunzioni, sia nel tipo che nella posizione, devono essere indicate con precisione nel progetto e devono essere eseguite nel massimo rispetto delle stesse prescrizioni progettuali. In fase esecutiva è sempre comunque opportuno rammentare che le giunzioni possono essere effettuate mediante:

- saldature eseguite in conformità alle norme vigenti, previo accertamento della saldabilità dell'acciaio in uso e della sua compatibilità con il metallo d'apporto, nelle posizioni o condizioni operative previste nel progetto esecutivo
- manicotto filettato
- sovrapposizione calcolata in modo da assicurare l'ancoraggio di ciascuna barra. In ogni caso la lunghezza di sovrapposizione in retto deve essere non minore di 20 volte il diametro e la prosecuzione di ciascuna barra deve essere deviata verso la zona compressa. La distanza mutua (intraferro) nella sovrapposizione non deve superare 6 volte il diametro.

Nelle unioni di sovrapposizione, se necessario, si devono valutare gli sforzi trasversali che si generano nel calcestruzzo circostante, che va protetto con specifiche armature addizionali, trasversali o di cerchiatura.

Le saldature non devono essere eseguite in una parte curva o in prossimità di una curva dell'armatura. La saldatura per punti è ammessa solo per l'assemblaggio delle armature.

Non deve essere permessa la saldatura delle armature di acciaio galvanizzato a meno di diverse specifiche prescrizioni, che indichino il procedimento da seguire per il ripristino della protezione.

5 Trasporto, messa in opera e compattazione del calcestruzzo

Dopo la miscelazione il calcestruzzo è trasportato a piè d'opera, gettato nelle casseforme, compattato e sottoposto a finitura. La facilità con cui si possono eseguire queste operazioni dipende dalla lavorabilità dell'impasto. Il termine "lavorabilità" è indicativo di molte proprietà che, per semplicità, sono generalmente riconducibili a consistenza e coesione. La consistenza è un indice della facilità con cui il calcestruzzo può essere fatto scorrere, mentre la coesione è rappresentativa della stabilità dell'impasto nei riguardi della segregazione e dell'essudamento. La consistenza dell'impasto deve essere tale da permettere il trasporto e la messa in opera del calcestruzzo con sufficiente facilità, senza che si verifichino fenomeni di segregazione.

La classe di consistenza ottimale dipende dal tipo di getto e dai mezzi disponibili per la compattazione e si valuta seguendo le procedure descritte nelle seguenti norme:

- Prove sul calcestruzzo fresco - cedimento al cono (UNI EN 12350-2)
- Prove sul calcestruzzo fresco - spandimento (UNI EN 12350-3)
- Prove sul calcestruzzo fresco - compattabilità (UNI EN 12350-4)
- Prove sul calcestruzzo fresco - tempo d'assestamento (UNI EN 12350-5).

Il calcestruzzo può essere considerato una sospensione di particelle solide con dimensioni variabili dal μm ai cm. Sotto l'azione delle forze gravitazionali i solidi sospesi si assestano in relazione alla massa volumica e dimensione.

L'essudazione è il fenomeno che riguarda la formazione di un velo d'acqua o di boiaccia acquosa sulla superficie del calcestruzzo che appare dopo il getto e la compattazione. La boiaccia affiora con i calcestruzzi magri o troppo fluidi dando luogo, ad indurimento avvenuto, ad una superficie incoerente e polverosa. Tali superfici sono il punto di innesco del degrado provocato dagli agenti atmosferici e dalle sostanze aggressive che possono penetrare attraverso i pori della matrice legante.

I metodi più comuni per ridurre gli effetti dell'essudazione sono: l'aggiunta di fini (sabbia e/o cemento), di materiali pozzolanici e/o l'inglobamento di aria.

Entro 2 ÷ 4 ore dopo la compattazione, si possono manifestare fessurazioni da assestamento plastico o da ritiro plastico. Entrambi i fenomeni sono associati all'acqua di essudazione.

Fessure da assestamento plastico possono comparire tutte le volte che si creano situazioni di sedimentazione differenziale, della quale le cause più frequenti sono: la presenza nel getto di elementi fissi (rinforzi, staffe, bordi delle casseforme disallineate – Fig. 5.1), l'interferenza dimensionale dell'aggregato grosso che dà origine ad essudazione interna, la presenza di piani inclinati, l'effetto parete e brusche variazioni di sezione (paragrafo 5.7.1 e Tab. 6.1).

La fessurazione da assestamento plastico può essere eliminata quando è possibile effettuare una rivibrazione entro 30 ÷ 60 minuti dal getto.

Si rimanda ai paragrafi 5.7, 5.7.1 e 5.7.2 per quanto riguarda il ritiro plastico e gli effetti delle condizioni atmosferiche sul medesimo.

5.1 *Trasporto del calcestruzzo fresco*

Il trasporto del calcestruzzo, dal sito di confezione al luogo d'impiego, deve essere effettuato con mezzi adeguati ad evitare la segregazione o il danneggiamento del conglomerato.

Terminata la miscelazione e durante la movimentazione, si può osservare una graduale diminuzione, nel tempo, della lavorabilità provocata: dall'assorbimento dell'acqua d'impasto da parte degli aggregati, dall'inizio delle reazioni d'idratazione del cemento e dalla perdita d'acqua per evaporazione. L'entità della perdita di lavorabilità dipende dai costituenti il calcestruzzo (cemento, additivi, acqua, aggregati), dalla temperatura e dalla velocità di evaporazione dell'acqua di impasto.

In figura 5-1 è rappresentato per alcuni tipi di calcestruzzo la diminuzione della consistenza in funzione del tempo misurata in condizioni standard di laboratorio (20°C), a partire da una classe di consistenza S5. In figura 5-2 è illustrato, a titolo indicativo, l'effetto della temperatura sulla consistenza, a 60' dalla miscelazione, per un calcestruzzo avente inizialmente una classe di consistenza S5.

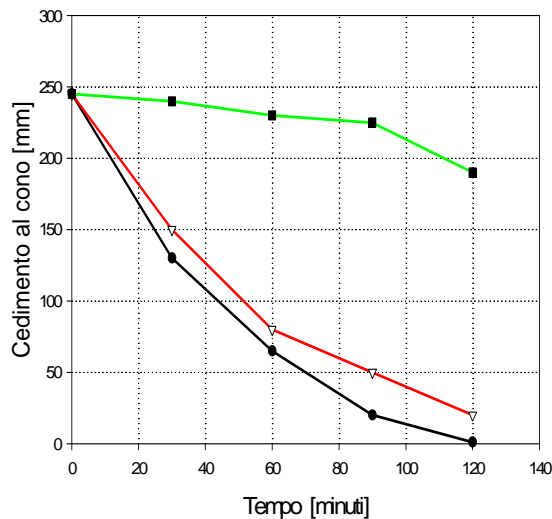


Figura 5-1 Andamento qualitativo della consistenza in funzione del tempo (a temperatura di 20°C) di calcestruzzi preparati con ricette differenti.

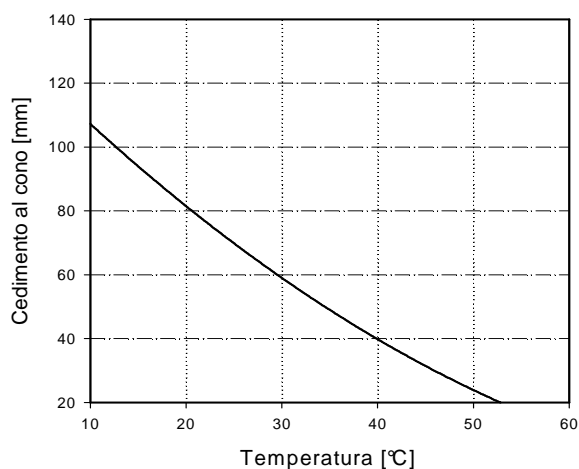


Figura 5-2 Andamento qualitativo del cedimento al cono a 60 minuti della miscela in funzione della temperatura di un calcestruzzo con consistenza iniziale S5.

I sistemi più utilizzati per il trasporto del calcestruzzo sono: l'autobetoniera, la benna, l'autocarro cassonato e il nastro trasportatore.

L'autobetoniera è idonea a trasportare quasi tutti i tipi di calcestruzzo e permette di mantenere per un periodo abbastanza lungo (2-3 ore) il calcestruzzo miscelato e non segregato, a condizione che l'impasto sia mantenuto in continua agitazione.

L'autocarro cassonato e il nastro trasportatore possono trasportare calcestruzzi a bassa consistenza, con cedimento al cono < 30 mm, quali, ad esempio, quelli destinati alle casseforme scorrevoli e quelli destinati a getti massivi. Il cassone e il nastro trasportatore devono essere protetti per evitare l'evaporazione dell'acqua o il dilavamento in caso di pioggia.

Per ogni carico di calcestruzzo si predispone un documento che, nel caso di calcestruzzo preconfezionato, deve contenere:

- la data e l'ora di confezione e i tempi d'inizio e fine getto (è opportuno, inoltre, che siano registrate le ore d'arrivo in cantiere, d'inizio e di fine scarico)
- la classe d'esposizione ambientale
- la classe di resistenza caratteristica
- il tipo, la classe del cemento, ove specificato nell'ordine di fornitura

- il rapporto a/c, se prescritto
- la dimensione massima dell'aggregato
- la classe di consistenza
- i metri cubi trasportati

Nel caso di calcestruzzo preparato in cantiere, deve essere almeno indicato:

- la classe di resistenza caratteristica
- i metri cubi trasportati

L'impresa costruttrice conserva la documentazione nella quale è specificata la struttura a cui il carico di calcestruzzo è stato destinato.

Tale documento deve formare oggetto di controllo e registrazione da parte di chi riceve il calcestruzzo.

Per maggiori dettagli circa la confezione, il trasporto e la consegna del calcestruzzo, sia esso preconfezionato o prodotto in cantiere, si può fare riferimento alle "Linee Guida per la produzione, il trasporto e il controllo del calcestruzzo preconfezionato", predisposte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

5.2 Calcestruzzo fresco a piè d'opera

Al ricevimento del calcestruzzo a piè d'opera è opportuno verificare:

- che nel corso del trasporto siano state applicate le precauzioni atte a ridurre la perdita di lavorabilità e ad evitare la segregazione
- la corrispondenza tra i requisiti ed i dati riportati nei documenti d'accompagnamento
- l'aspetto del conglomerato fresco.

Nel caso di dubbio sulla conformità è opportuno effettuare i necessari controlli. Possono essere rilevate direttamente (a piè d'opera) alcune difformità legate all'aspetto del calcestruzzo quali: colore, composizione degli aggregati, diametro massimo dell'aggregato. Tali differenze devono essere segnalate al responsabile della produzione del calcestruzzo e, se del caso, danno origine al rifiuto.

In conformità alle disposizioni vigenti, i controlli sulle caratteristiche del calcestruzzo fresco devono essere effettuati con prelievi a piè d'opera e, nel caso del calcestruzzo preconfezionato, i controlli devono essere eseguiti al momento dello scarico in contraddittorio tra le parti interessate alla fornitura.

A tale scopo vengono generalmente eseguite, su un unico campione rappresentativo ottenuto secondo le procedure descritte nella UNI EN 12350-1, le seguenti prove: misura della consistenza, confezione dei provini per prove di resistenza, determinazione della massa volumica, verifica del contenuto d'aria, controllo del rapporto acqua/cemento.

Il calcestruzzo autocompattante richiede uno specifico controllo delle sue proprietà alla consegna che riguarda la verifica del valore di scorrimento (libero e vincolato) e quella dell'omogeneità dell'impasto secondo le procedure indicate nella UNI 11040 (Calcestruzzo autocompattante: specifiche, caratteristiche e controlli).

La tabella seguente riporta lo schema dei possibili controlli da svolgere sul calcestruzzo fresco, alcuni dei quali sono specificati nella UNI EN 206-1.

	Procedura	Requisiti	Frequenza
Documento di produzione o bolla d'accompagnamento	Verifica visiva	Conformità alle specifiche	Ogni partita (consegna)
Consistenza (lavorabilità) del calcestruzzo	Verifica visiva e controllo secondo il metodo di riferimento	Conformità alla classe di consistenza	Quando opportuno, nel corso dei prelievi per la valutazione della resistenza
Omogeneità del calcestruzzo	Verifica visiva e/o confronto tra le proprietà di differenti partite (consegne)	Aspetto uniforme, e di sottocampioni omogenei.	In caso di dubbio
Massa volumica del calcestruzzo fresco	UNI EN 12350-6	Verifica della miscela	Se richiesto dalle specifiche tecniche o dalla Direzione Lavori
Dosaggio in cemento	Controllo della quantità pesata dei costituenti nella preparazione dell'impasto	Verifica della miscela	Se richiesto dalle specifiche tecniche o dalla Direzione Lavori
Dosaggio in acqua e rapporto acqua/cemento	Controllo della quantità dosata nell'impasto o secondo metodologia da concordarsi tra le parti	Verifica della miscela	Se richiesto dalle specifiche tecniche o dalla Direzione Lavori
Prelievo di campioni per verifica della resistenza a compressione.	Secondo le procedure previste dalla norma	Verifica Rck alla scadenza ordinaria e se necessario alle brevi stagionature	Secondo le vigenti norme tecniche e/o secondo le specifiche progettuali, se più restrittive
Contenuto d'aria	UNI EN 12350-7	Conformità alle specifiche.	Se richiesto per la classe di esposizione e nelle specifiche progettuali
Altre caratteristiche: ora di consegna, ora di messa in opera temperatura calcestruzzo fresco	Registrazione		Secondo richiesta
Rilavorazione (per riprendere la consistenza prescritta)	Registrazione. La rilavorazione deve essere vietata se comporta una riduzione inaccettabile delle prestazioni del calcestruzzo	Dosaggio e tipo d'additivo aggiunto	Ogni qual volta è effettuata

5.3 *Controllo della resistenza alla compressione*

Il controllo di base, per l'accettazione del calcestruzzo in cantiere, deve soddisfare le prescrizioni di cui allo specifico paragrafo "Controlli di accettazione" riportato nelle vigenti Norme Tecniche emanate dal Ministero delle Infrastrutture. Le prove da effettuare ai fini dell'accettazione devono essere eseguite in conformità alle norme UNI EN 12350 - 1 per quanto attiene il campionamento, ed alle norme UNI EN 12390, nelle varie parti, per quanto attiene il confezionamento e la stagionatura dei provini, nonché le relative prove di resistenza a compressione.

5.4 *Messa in opera del calcestruzzo*

La messa in opera del calcestruzzo comprende le operazioni di movimentazione e getto del materiale nelle apposite casseforme.

Per assicurare la migliore riuscita del getto, la messa in opera del calcestruzzo richiede una serie di verifiche preventive che riguardano, oltre che le casseforme e i ferri d'armatura, anche l'organizzazione e l'esecuzione delle operazioni di getto, di protezione e di stagionatura del calcestruzzo.

5.4.1 *Movimentazione del calcestruzzo*

La movimentazione del calcestruzzo dal mezzo di trasporto al punto di messa in opera può essere effettuata mediante uno dei seguenti dispositivi: canaletta, benna, nastro trasportatore, pompa. Il mezzo deve essere scelto tenendo in considerazione le caratteristiche del calcestruzzo allo stato fresco, la distanza tra il punto d'arrivo del mezzo e quello di getto, le condizioni climatiche, la conformazione delle casseforme e del cantiere, le attrezzature di compattazione disponibili e la velocità d'avanzamento prevista.

5.4.1.1 *Movimentazione mediante canaletta*

Al fine di ottenere una corretta messa in opera, la canaletta deve avere pendenza e lunghezza compatibili con la classe di consistenza del calcestruzzo. Generalmente le autobetoniere sono attrezzate con canalette che consentono la distribuzione diretta del calcestruzzo entro il raggio d'alcuni metri. E' opportuno che, per proteggere il calcestruzzo dal rapido essiccamento, la canaletta sia protetta dal vento e dal sole. Per evitare la segregazione del calcestruzzo, all'atto dello scarico e nell'eventuale passaggio da una canaletta all'altra, si predispone una tramoggia che accompagna la discesa del calcestruzzo in direzione verticale. La segregazione è infatti provocata non tanto dalla lunghezza della canaletta quanto dalla caduta libera del calcestruzzo alla sua estremità. La canaletta deve essere accuratamente ripulita al termine di ogni operazione di scarico. Per motivi di sicurezza, le canalette delle autobetoniere devono essere opportunamente vincolate in modo da evitare gli spostamenti laterali, i sostegni della canaletta di cantiere devono essere idonee a sopportare il carico statico e dinamico del calcestruzzo.

5.4.1.2 *Movimentazione con benna*

La benna permette di movimentare quantità ridotte di calcestruzzo in punti dislocati in modo disperso nella struttura in costruzione. Questa soluzione è preferibile nei casi in cui si operi a quote elevate rispetto al piano di consegna del calcestruzzo e sia installata una gru. La gru permette di distribuire in modo efficace il calcestruzzo entro un ampio raggio d'azione in virtù della capacità dei movimenti traslatori orizzontali, verticali e rotazionali. I limiti di questo sistema di movimentazione sono la portata ed i vincoli della gru. Si deve tener presente che, all'aumentare dello sbraccio, la gru riduce la propria capacità di sollevamento.

Le specifiche del calcestruzzo idoneo ad essere movimentato mediante benna riguardano solo la consistenza, che deve essere tale da far defluire il calcestruzzo dalla bocca senza segregare.

Per accompagnare il calcestruzzo entro le casseforme delle strutture verticali, evitando la caduta libera che provoca la segregazione, è consigliabile l'impiego di un tubo getto che, immerso nella superficie del calcestruzzo fresco, ne permetta l'immissione dal basso o, in alternativa, l'applicazione alla bocca di scarico della benna di un tubo di gomma flessibile, avente diametro di 15 – 20 cm e lunghezza tale da ridurre la caduta libera del calcestruzzo a meno di 50 cm. Tale accorgimento è particolarmente importante per i calcestruzzi fluidi (consistenza \geq S4 secondo la norma UNI EN 206-1) e per quelli autocompattanti.

5.4.1.3 Movimentazione con nastri trasportatori

Il trasporto mediante nastro è condizionato dalle proprietà del calcestruzzo che non deve segregare, non deve essiccare in modo rilevante e non deve "aderire" al nastro. Il nastro di ritorno, ripulito mediante gli specifici raschia-nastro, deve rimanere liberato dalla malta o pasta cementizia. Per evitare la segregazione allo scarico è opportuno predisporre, all'estremità del nastro, una tramoggia che permetta lo scarico verticale.

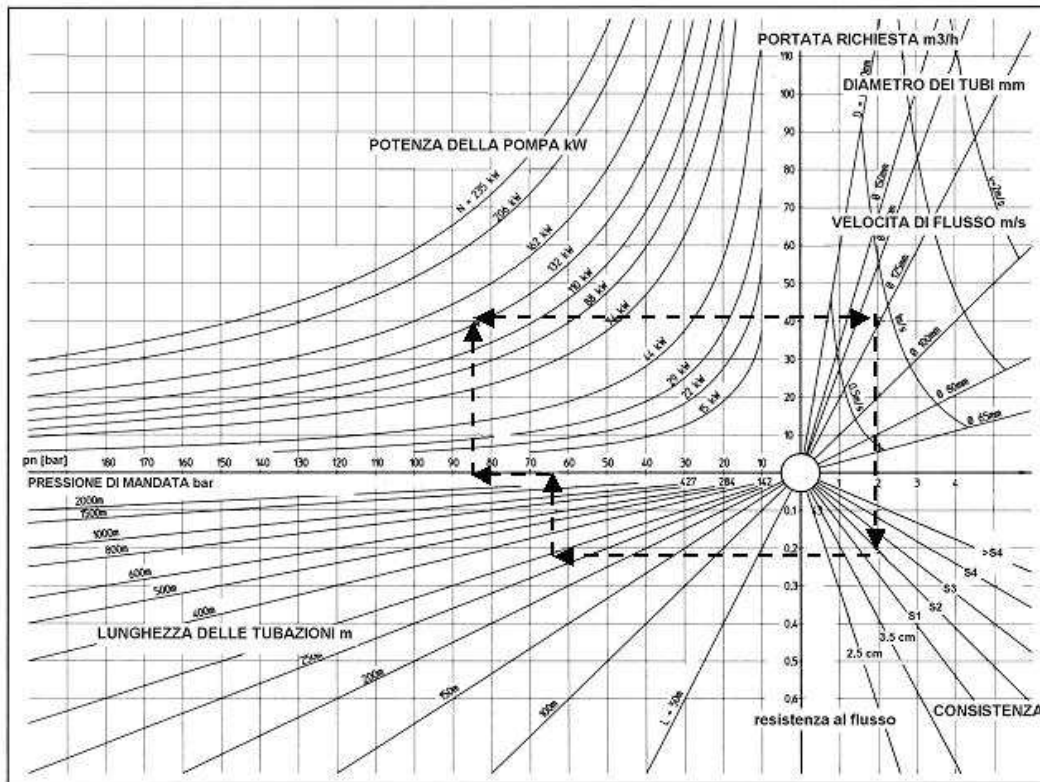
Nel caso in cui sia necessario utilizzare più di un nastro, per evitare la segregazione, è opportuno inserire una tramoggia per trasferire il calcestruzzo da un nastro all'altro. Per salvaguardare l'omogeneità del calcestruzzo è necessario stabilire ed ottimizzare la velocità di traslazione e la pendenza del nastro.

Questo tipo di movimentazione è idoneo per calcestruzzi di consistenza plastica (S3) o più rigidi, senza limitazioni per la dimensione massima dell'aggregato.

5.4.1.4 Movimentazione mediante pompa

Le prestazioni operative delle pompe sono espresse in termini di potenza, portata e pressione massima d'esercizio, che condizionano la possibile distanza e prevalenza (altezza) di pompaggio del calcestruzzo come risulta dal diagramma di figura [5-3].

Le caratteristiche della pompa: (portata, distanza ed altezza di pompaggio) devono essere prese in considerazione nell'organizzazione del cantiere in modo che il mezzo sia appropriato alle esigenze del getto (figura 5-5).



Per utilizzare il diagramma, si entra, in relazione alla portata necessaria, sull'asse delle ordinate in alto, ci si sposta orizzontalmente fino ad incontrare le linee relative al diametro della tubazione (nel medesimo quadrante si ricava la velocità di flusso), ci si sposta verticalmente nel quadrante in basso a destra fino ad incontrare le linee relative alla consistenza del calcestruzzo, ci si sposta orizzontalmente nel quadrante in basso a destra fino ad incrociare le linee relative alla lunghezza delle tubazioni. Risalendo verticalmente s'incrocia l'asse delle ascisse che riporta la pressione di mandata. Per tener conto della differenza di quota tra la mandata e lo scarico ci si sposta orizzontalmente (1 bar di pressione corrisponde a 4 metri di quota), ci s'innalza quindi nel quadrante superiore di sinistra fino ad incrociare la curva della potenza in relazione alla portata richiesta (punto di partenza).

Figura 5-3 - Diagramma per il calcolo della potenza di pompaggio

RELAZIONI DI RIFERIMENTO

Il diagramma fa riferimento alle seguenti relazioni:

la pressione (p) dovuta alla perdita di carico [bar] è data da:

$$p = b * \frac{16 * QL}{\pi D^3}$$

dove:

b = coefficiente che dipende della consistenza del calcestruzzo [1.18 ÷ 6.14],

L = lunghezza delle tubazioni [m],

Q = portata [m³/h).

La pressione di mandata (p_m) è la somma della pressione dovuta alle perdite di carico (p) con quella dovuta alla differenza di quota: 1 bar ogni 4 metri.

La potenza della pompa [kW] è data da: $N = \frac{p_m * Q}{25}$

Le pompe per calcestruzzo, in base alle loro caratteristiche, possono essere così classificate:

- pompe su autocarro, od autocarrate. Rappresentano il tipo di pompa più comune, sono usate nei cantieri in cui il braccio idraulico ha sufficiente spazio per muoversi ed il punto di posa del calcestruzzo dista 30-40 metri dalla pompa
- pompe su autobetoniera, o auto-beton-pompe hanno capacità ridotta sia in termini di portata sia di distanza di trasporto, il loro impiego è dedicato ai cantieri di medio impegno. Spesso pompano il solo calcestruzzo trasportato dalla betoniera stessa, ma il loro impiego non comporta l'impegno di una macchina dedicata
- pompe carrellate. Sono usate in postazioni fisse, in grossi cantieri che richiedono frequenti pompaggi di consistenti quantitativi di calcestruzzo. Alla pompa sono collegati elementi di tubazione fissi ed, in alcuni casi (grattacieli, alte pile di ponti, ...), alla loro estremità è collegato un braccio idraulico di distribuzione. Le pompe carrellate trovano impiego anche nei piccoli cantieri ove non c'è spazio sufficiente (es.: nei centri storici) per posizionare una pompa autocarrata e la benna della gru non è in grado di raggiungere i punti di getto.

All'estremità della tubazione metallica di pompaggio generalmente è inserito un tubo flessibile che facilita la distribuzione del calcestruzzo entro le casseforme, ma che, di contro, induce una maggiore perdita di carico rispetto a quello metallico. Per motivi di sicurezza si deve evitare di sottoporre la tubazione flessibile a curve strette, ponendo attenzione ai possibili repentini scuotimenti dovuti ad aumenti della pressione di pompaggio.

Le tubazioni fisse devono essere disposte secondo un tracciato il più lineare possibile, evitando la formazione di curve strette. Per evitare pericolose espulsioni di calcestruzzo dovute a cedimenti delle tubazioni in pressione, è necessario verificare sistematicamente lo stato delle tubazioni e, in modo particolare, il loro stato di usura, nonché il corretto fissaggio degli elementi di congiunzione.

Nella stagione estiva è bene proteggere le tubazioni dall'esposizione diretta ai raggi solari in modo da limitarne il riscaldamento.

Prima di iniziare il pompaggio, la superficie interna della tubazione deve essere lubrificata con boiaccia cementizia o apposito additivo compatibile con il calcestruzzo. Una volta iniziato il flusso, il calcestruzzo stesso mantiene la superficie di contatto rivestita di boiaccia. La boiaccia cementizia di lubrificazione non può essere miscelata con il calcestruzzo ed immessa nei casseri.

Affinché l'operazione di pompaggio possa procedere in modo soddisfacente, è necessario che l'impasto sia alimentato in modo continuo, risulti uniforme, di buona qualità, omogeneamente mescolato e correttamente dosato, con aggregati di adeguato assortimento granulometrico. E' buona norma prevedere un diametro massimo dell'aggregato non eccedente un quarto del diametro della tubazione e non maggiore di 32 mm. Il calcestruzzo, spinto dal movimento alterno dei pistoni, deve poter fluire nelle tubazioni senza contraccolpi, in modo continuo. Nel caso in cui, a seguito delle esigenze di posa in opera, sia necessario interrompere il pompaggio, per impedirne l'intasamento, l'operatore della pompa opera brevi ed alterni movimenti di spinta ed aspirazione del

calcestruzzo. Dopo 10 ÷ 20 minuti d'interruzione, in relazione alla temperatura dell'ambiente, è necessario effettuare la pulizia del sistema.

È opportuno che, a lato dell'ordine (nelle specifiche) sia segnalata la previsione di pompare il calcestruzzo.

La consistenza ideale del calcestruzzo pompabile è compresa tra S3 – S5; i calcestruzzi più rigidi possono essere egualmente pompati senza problemi a condizione che abbiano una buona coesione. Nel caso del pompaggio verso il basso, è importante che sia corretta la composizione del calcestruzzo, giacché la depressione che si forma nel tubo può produrre il risucchio dell'acqua con conseguente problema d'intasamento.

La pompa deve essere disposta, specialmente in condizioni di clima caldo, il più possibile prossima al sito di messa in opera. Prima d'ogni utilizzo è necessario verificare il funzionamento e l'efficienza di tutte le parti della pompa stessa.

La messa in opera mediante pompa del calcestruzzo alleggerito preparato con argilla espansa richiede particolari avvertenze. L'aggregato leggero deve essere pre-saturato con acqua prima della miscelazione con gli altri costituenti. Se l'aggregato non è saturo d'acqua, la pressione elevata che si stabilisce nella pompa e nelle tubazioni costringe l'acqua a migrare all'interno dei granuli con conseguenti problemi di bloccaggio.

A parità di portata, per il pompaggio dei calcestruzzi autocompattanti, si deve prevedere una maggiore pressione di quella necessaria al pompaggio dei calcestruzzi ordinari; per non sovraccaricare la pompa è opportuno ridurre la velocità di flusso aumentando la sezione dei tubi.

5.4.2 Operazioni di getto

Considerata l'importanza delle operazioni di getto, che riguardano la posa in opera del calcestruzzo e tutte le fasi relative, è necessario stabilire un programma di verifiche comprendenti:

- il coordinamento con la Direzione Lavori, con il progettista, con i laboratori esterni per ispezioni, verifiche, prelievi di campioni e prove a piè d'opera
- l'istruzione/coordinamento con i fornitori e subappaltatori, per la consegna del calcestruzzo delle caratteristiche prescritte
- Nel caso di calcestruzzo preconfezionato, le istruzioni/ordini circa le prestazioni, il programma della fornitura, l'eventuale necessità della pompa con relative caratteristiche
- l'istruzione agli operatori per organizzare la messa in opera, compattazione e stagionatura del calcestruzzo, in funzione dei volumi, delle sequenze e degli spessori dei getti, della movimentazione e vibrazione del materiale, della protezione e stagionatura della struttura, delle condizioni climatiche, nonché delle eventuali superfici di contatto.

L'impresa esecutrice è tenuta a comunicare con dovuto anticipo al Direttore dei Lavori il programma dei getti indicando:

- il luogo di getto
- la struttura interessata dal getto
- la classe di resistenza e di consistenza del calcestruzzo.

I getti dovrebbero avere inizio solo dopo che il Direttore dei Lavori ha verificato:

- la preparazione e rettifica dei piani di posa
- la pulizia delle casseforme
- la posizione e corrispondenza al progetto delle armature e del copriferro
- la posizione delle eventuali guaine dei cavi di precompressione
- la posizione degli inserti (giunti, water stop, ecc.)
- l'umidificazione a rifiuto delle superfici assorbenti o la stesura del disarmante.

Nel caso di getti contro terra è bene controllare che siano eseguite, in conformità alle disposizioni di progetto, le seguenti operazioni:

- la pulizia del sottofondo
- la posizione di eventuali drenaggi
- la stesa di materiale isolante e/o di collegamento.

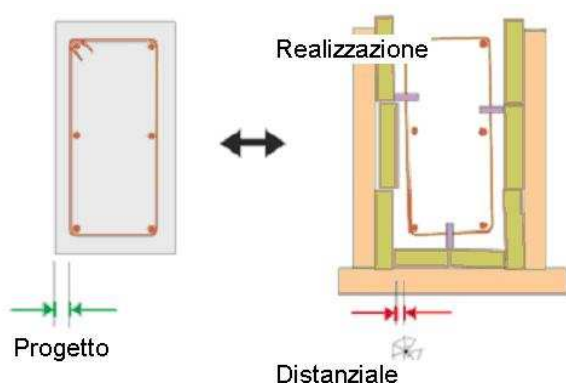


Figura 5-4 Punti di controllo della cassaforma, della armatura e del copriferro

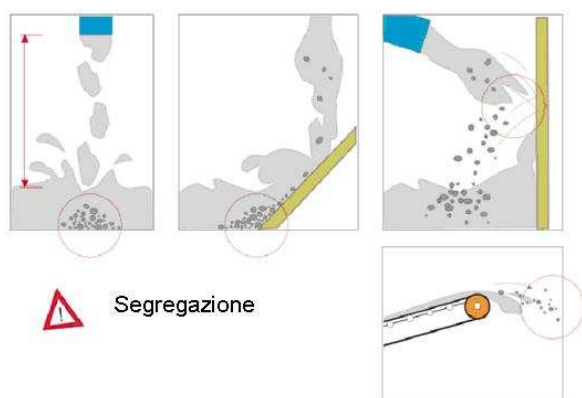


Figura 5-5: Errori nella posa in opera del calcestruzzo

5.4.2.1

Scarico del calcestruzzo ordinario

Lo scarico del calcestruzzo dal mezzo di trasporto nelle casseforme si effettua applicando tutti gli accorgimenti atti ad evitare la segregazione, come illustrato in figura 5-5.

È opportuno che l'altezza di caduta libera del calcestruzzo fresco, indipendentemente dal sistema di movimentazione e getto, non ecceda 50-80 cm e che lo spessore degli strati orizzontali di calcestruzzo, misurato dopo la vibrazione, non sia maggiore di 30 cm (come illustrato in figura 5-6).

Si deve evitare di scaricare il calcestruzzo in cumuli da stendere poi successivamente con l'impiego dei vibratori, in quanto questo procedimento può provocare l'affioramento della pasta cementizia e la segregazione. Per limitare l'altezza di caduta libera del calcestruzzo, è opportuno utilizzare un tubo di getto che consenta al calcestruzzo di fluire all'interno di quello precedentemente messo in opera. La funzionalità delle attrezzature ausiliarie per la messa in opera è illustrata in figura 5-7.

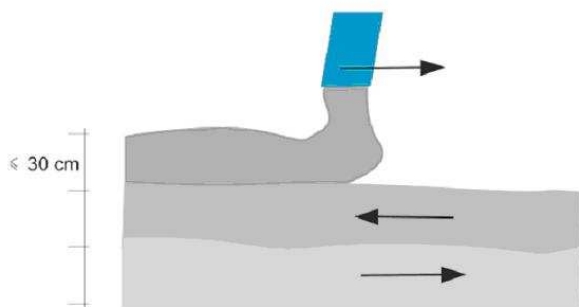


Figura 5-6 *Disposizione e spessore dello strato nel corso della messa in opera.*

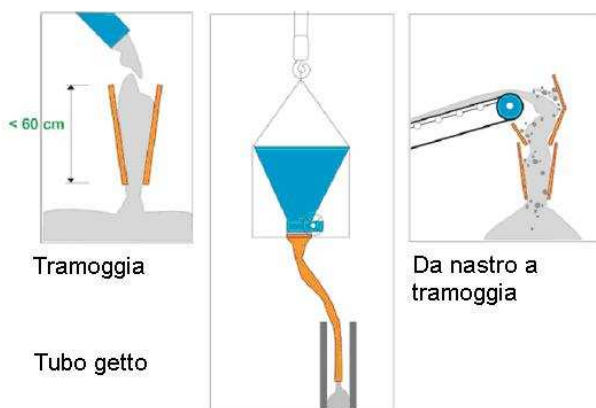


Figura 5-7: *Attrezzature per la messa in opera del calcestruzzo.*

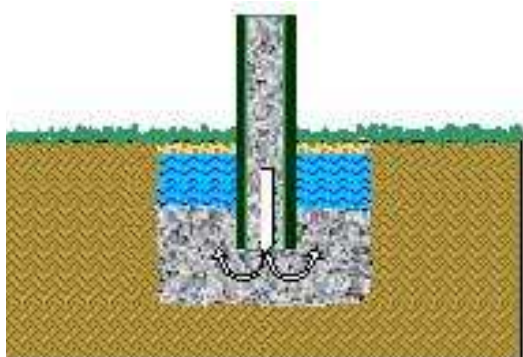


Figura 5-8: *Getto di calcestruzzo in presenza di acqua*

Nei getti in pendenza è opportuno predisporre dei cordolini d'arresto atti ad evitare la formazione di lingue di calcestruzzo tanto sottili da non poter essere compattate in modo efficace. Nel caso di getti in presenza d'acqua è opportuno:

- adottare gli accorgimenti atti ad impedire che l'acqua dilavi il calcestruzzo e ne pregiudichi la regolare presa e maturazione
- provvedere, con i mezzi più adeguati, alla deviazione dell'acqua e adottare miscele di calcestruzzo, coesive, con caratteristiche antidilavamento, preventivamente provate ed autorizzate dal Direttore dei Lavori
- utilizzare una tecnica di messa in opera che permetta di gettare il calcestruzzo fresco dentro il calcestruzzo fresco precedentemente gettato, in modo da far rifluire il calcestruzzo verso l'alto, limitando così il contatto diretto tra l'acqua ed il calcestruzzo fresco in movimento, come illustrato in figura 5-8.

5.4.2.2 Scarico del calcestruzzo autocompattante (SCC)

Il calcestruzzo autocompattante deve essere versato nelle casseforme in modo da evitare la segregazione e favorire il flusso attraverso le armature e le parti più difficili da raggiungere nelle casseforme. L'immissione per mezzo di una tubazione flessibile può facilitare la distribuzione del calcestruzzo. Se si usa una pompa, una tramoggia o se si fa uso della benna, il terminale di gomma deve essere predisposto in modo che il calcestruzzo possa distribuirsi omogeneamente entro la cassaforma; per limitare il tenore d'aria occlusa è opportuno che il tubo di scarico rimanga sempre immerso nel calcestruzzo.

Nel caso di getti verticali ed impiego di pompa, qualora le condizioni operative lo permettano, si suggerisce di immettere il calcestruzzo dal fondo. Questo accorgimento favorisce la fuoriuscita dell'aria e limita la presenza di bolle d'aria sulla superficie. L'obiettivo è raggiunto fissando al fondo della cassaforma un raccordo di tubazione per pompa, munito di saracinesca, collegato al terminale della tubazione della pompa.

Indicativamente un calcestruzzo autocompattante ben formulato ha una distanza di scorrimento orizzontale di circa 10 metri; tale distanza dipende comunque anche dalla densità delle armature.

5.4.3 *Riprese di getto*

Per quanto possibile, i getti devono essere eseguiti senza soluzione di continuità, in modo da evitare le riprese e conseguire la necessaria continuità strutturale. Per ottenere ciò è opportuno ridurre al minimo il tempo di ricopertura tra gli strati successivi, in modo che, mediante vibrazione, si ottenga la monoliticità del calcestruzzo. Qualora siano inevitabili le riprese di getto, è necessario che la superficie del getto su cui si prevede la ripresa, sia lasciata quanto più possibile corrugata, alternativamente la superficie deve essere scalfita (e pulita dai detriti), in modo da migliorare l'adesione con il getto successivo. L'adesione può essere migliorata con specifici adesivi per ripresa di getto (resine), o con tecniche diverse che prevedono l'utilizzo d'additivi ritardanti o ritardanti superficiali da aggiungere al calcestruzzo o da applicare sulla superficie.

Anche se le soluzioni sopraindicate mirano ad ottenere il monolitismo tra i getti successivi, per assicurare la continuità strutturale, le riprese di getto devono essere orientate su piani quanto più possibili ortogonali alla direzione dei flussi di compressione che si destano poi nella struttura in servizio, in modo da garantire un'imposta efficace per tali compressioni (come illustrato in figura 5-9).

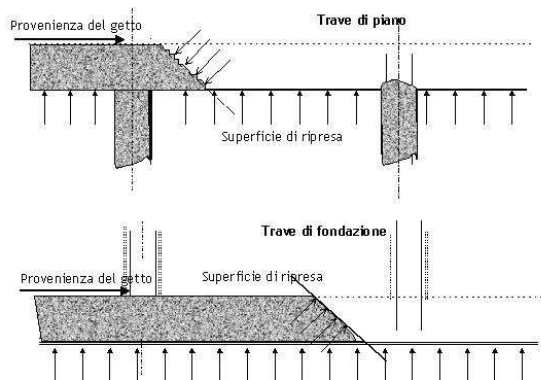


Figura 5-9: Ripresa di getto in travi di piano e di fondazione

loro asse (questo è ad esempio, il caso delle travi gettate in più riprese sulla loro altezza) (come illustrato in figura 5-10).

Tra le riprese di getto sono da evitare i distacchi, le discontinuità o le differenze d'aspetto e colore.

Nel caso di getti di calcestruzzo a vista, le disposizioni, progettuali o di capitolato, devono contenere indicazioni e specifiche riguardanti la posizione e le modalità esecutive delle riprese di getto.

Nelle strutture impermeabili dovrà essere garantita la tenuta all'acqua dei giunti di costruzione con accorgimenti, (da indicare nel progetto e nelle prescrizioni di capitolato) quali: la prescrizione di miscela impermeabili, l'interposizione di giunti *waterstop*, la continuità del getto.

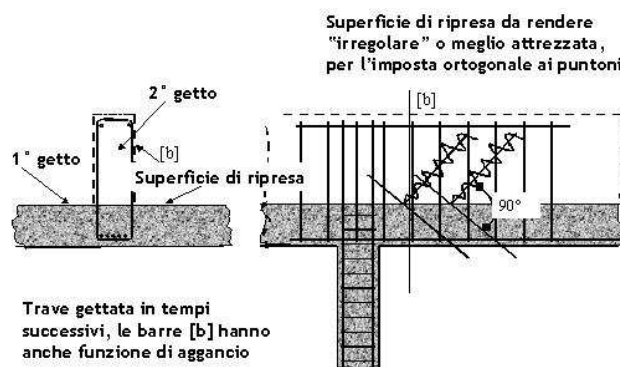


Figura 5-10: Ripresa di getto su travi di spessore elevato

5.5 Compattazione del calcestruzzo

Quando il calcestruzzo fresco è versato nella cassaforma, contiene molti vuoti e tasche d'aria racchiusa tra gli aggregati grossolani rivestiti parzialmente da malta. Il volume di tale aria, che si aggira tra il 5 ed il 20 %, dipende dalla consistenza del calcestruzzo, dalla dimensione della cassaforma, dalla distribuzione e dall'addensamento delle barre d'armatura e dal modo con cui il calcestruzzo è stato versato nella cassaforma (figura 5-11).

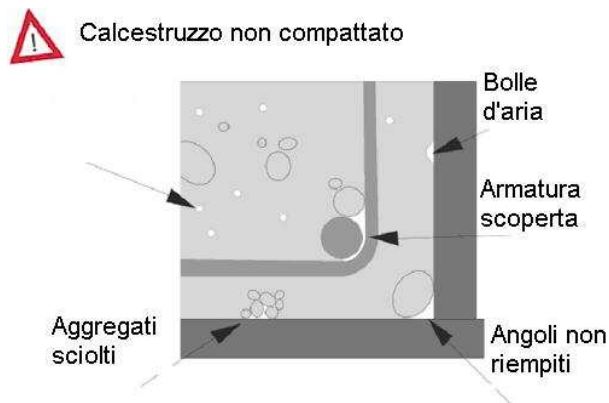


Figura 5-11: Difettosità interne del calcestruzzo non compattato.

Se il calcestruzzo indurisse in questa condizione risulterebbe disomogeneo, poroso, poco resistente e scarsamente aderente alle barre d'armatura. Per raggiungere le proprietà desiderate, il calcestruzzo deve essere compattato. La compattazione è il processo mediante il quale le particelle solide del calcestruzzo fresco si serrano tra loro riducendo i vuoti. Tale processo può essere effettuato mediante: vibrazione, centrifugazione, battitura, assestamento.

I calcestruzzi con classi di consistenza S1 e S2, che allo stato fresco sono generalmente rigidi, richiedono una compattazione più energica dei calcestruzzi di classe S3 o S4, aventi consistenza plastica o plastica fluida.

La lavorabilità di un calcestruzzo formulato originariamente con poca acqua, non può essere migliorata aggiungendo acqua. Tale aggiunta penalizza la resistenza e dà luogo alla formazione di una miscela instabile che tende a segregare durante la messa in opera. Quando necessario possono essere utilizzati degli additivi fluidificanti o, talvolta, superfluidificanti.

Nel predisporre il sistema di compattazione si deve prendere in considerazione la consistenza effettiva del calcestruzzo al momento della messa in opera che, per effetto della temperatura e della durata di trasporto, può essere inferiore a quella rilevata al termine dell'impasto.

5.5.1 Compattazione mediante vibrazione

La vibrazione consiste nell'imporre al calcestruzzo fresco rapide vibrazioni che fluidificano la malta e drasticamente riducono l'attrito interno esistente tra gli aggregati. In questa condizione il calcestruzzo si assesta per effetto della forza di gravità, fluisce nelle casseforme, avvolge le armature ed espelle l'aria intrappolata. Al termine della vibrazione l'attrito interno ristabilisce lo stato di quiete e il calcestruzzo risulta denso e compatto.

I vibratorii possono essere: interni ed esterni.

I vibratorii interni, detti anche ad immersione o ad ago, sono i più usati nei cantieri, essi sono costituiti da una sonda o ago, contenente un albero eccentrico azionato da un motore tramite una trasmissione flessibile. Il loro raggio d'azione, in relazione al diametro, varia tra 0,2 e 0,6 m mentre la frequenza di vibrazione, quando il vibratore è immerso nel calcestruzzo, è compresa tra 90 e 250 Hz (figura 5-12).

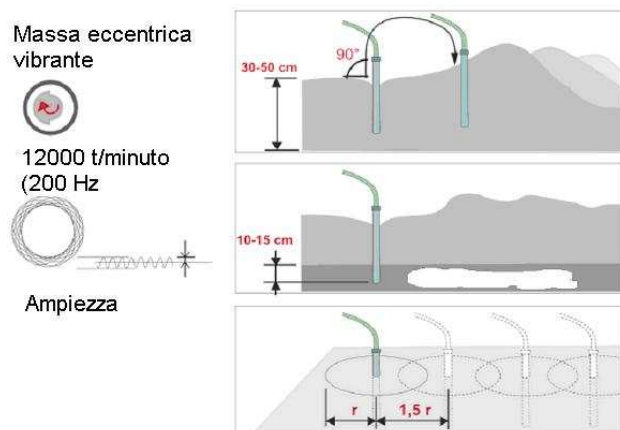


Figura 5-12: Caratteristiche dei vibratori interni.

Per effettuare la compattazione l'ago vibrante è introdotto verticalmente, è spostato da punto a punto nel calcestruzzo, con tempi di permanenza da 5 a 30 sec. L'effettivo completamento della compattazione può essere valutato dall'aspetto della superficie, che non deve essere né porosa né eccessivamente ricca di malta. L'estrazione dell'ago deve essere graduale ed effettuata in modo da permettere la richiusura del foro da esso lasciato. L'ago deve essere

introdotto per l'intero spessore del getto fresco, e per 5-10 cm in quello sottostante, se questo è ancora lavorabile. In tal modo si ottiene un adeguato legame tra gli strati e si impedisce la formazione di un "giunto freddo" tra due strati di getti sovrapposti.

I cumuli che inevitabilmente si formano quando il calcestruzzo è versato nei casseri devono essere livellati inserendo il vibratore entro la loro sommità. Per evitare la segregazione, il calcestruzzo non deve essere spostato lateralmente con i vibratori mantenuti in posizione orizzontale, operazione che comporterebbe un forte affioramento di pasta cementizia con contestuale sedimentazione degli aggregati grossi.

La vibrazione ottenuta affiancando il vibratore alle barre d'armatura è tollerata solo se: l'addensamento tra le barre impedisce l'ingresso del vibratore ed a condizione che, non ci siano sottostanti strati di calcestruzzo in fase d'indurimento.

Qualora il getto comporti la messa in opera di più strati, si dovrà programmare la consegna del calcestruzzo in modo che ogni strato sia disposto sul precedente quando questo è ancora allo strato plastico così da evitare i "giunti freddi".

I vibratori esterni sono utilizzati generalmente negli impianti di prefabbricazione; possono comunque essere utilizzati anche nei cantieri quando la struttura è complessa o l'addensamento delle barre d'armatura limita o impedisce l'inserimento di un vibratore ad immersione.

I vibratori superficiali applicano la vibrazione tramite una sezione piana appoggiata alla superficie del getto, in questo modo il calcestruzzo è sollecitato in tutte le direzioni e la tendenza a segregare è minima. Un martello elettrico può essere usato come vibratore superficiale se combinato con una piastra d'adeguata sezione. Per consolidare sezioni sottili è utile l'impiego di rulli vibranti. Per pavimentazioni stradali sono disponibili finitrici vibranti e macchinari di vario genere, i cui dettagli esulano dallo scopo di questo documento.

5.6 Calcestruzzo proiettato

Il calcestruzzo proiettato è una miscela di cemento, aggregati, acqua ed eventuali aggiunte e/o additivi e/o fibre, che, proiettata mediante una lancia ad aria compressa sulla superficie d'applicazione, consente di ottenere una massa compatta ed omogenea.

Normalmente il diametro massimo delle particelle dell'aggregato non supera 12 – 15 mm; qualora la dimensione massima dei granuli sia ≤ 4 mm (aggregato fine), il calcestruzzo proiettato è denominato gunite.

Il calcestruzzo proiettato è utilizzato nelle opere di ingegneria civile in cui è richiesta: la messa in opera di calcestruzzo in assenza di casseforme su strati successivi e quando sono richieste resistenze meccaniche elevate anche a brevissima scadenza.

Quando il calcestruzzo proiettato ha funzioni strutturali (rivestimento e protezione di superfici di scavo in galleria, riparazioni di strutture in calcestruzzo) le caratteristiche meccaniche devono soddisfare le prescrizioni della legislazione vigente sui calcestruzzi ordinari.

La resistenza a compressione del calcestruzzo proiettato, caratterizzato da classi di resistenza comprese tra 15 e 40 MPa (UNI EN 206-1), è valutata su provini estratti mediante carotaggio dal calcestruzzo in opera.

Il procedimento di messa in opera più utilizzato è quello per via umida in cui la miscela base, impastata con acqua, è immessa in una pompa meccanica (flusso denso) o pneumatica (flusso aerato) che la convoglia fino alla lancia di proiezione ove sono introdotti: aria compressa, per aumentare la velocità di uscita, e specifici additivi.

I costituenti per la realizzazione della miscela base (cemento, aggregati, aggiunte, acqua, eventuali additivi e fibre) devono essere preventivamente mescolati per il tempo sufficiente a costituire una miscela omogenea.

La pompa deve essere in grado di garantire un flusso costante di materiale senza intermittenze che possano provocare la segregazione durante la proiezione. La proiezione della miscela attraverso la lancia è ottenuta con aria compressa, la lancia deve garantire la proiezione, con un getto concentrato, fino alla distanza di circa 1,5 m (dalla lancia).

Per addensare la miscela umida fresca e accelerare lo sviluppo delle resistenze meccaniche, si usano particolari additivi acceleranti, allo stato solido o liquido, che hanno anche la funzione di conferire al calcestruzzo proiettato, in tempi molto brevi, capacità auto-portante.

Per motivi ecologici ed igienici può essere prescritto l'utilizzo di additivo accelerante esente da alcali, con un contenuto in alcali equivalente ($\text{Na}_2\text{O} + 0,64 \text{ K}_2\text{O}$) inferiore a 1% in massa.

L'alimentatore dell'additivo deve essere dotato di un dosatore che immette l'additivo stesso in quantità proporzionale alla miscela pompata. Il dosatore deve essere in grado di alimentare l'additivo accelerante con oscillazioni che, rispetto al valore prefissato, risultino inferiori al 10%.

La temperatura della "miscela base" prima dell'impiego non deve essere né minore di $(5 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ né maggiore di $(35 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$.

La messa in opera del calcestruzzo proiettato deve essere preceduta dalla preparazione delle superfici di getto con opere riguardanti:

- la rimozione di blocchi instabili e/o del materiale incoerente,
- la pre-umidificazione di superfici particolarmente assorbenti,
- la captazione e/o il controllo delle venute d'acqua,

e nel caso di riparazioni o ristrutturazioni:

- la rimozione dello strato incoerente o fortemente degradato.

Le eventuali reti d'armatura devono essere posate e fissate in modo da consentire il loro corretto ricoprimento e impedire la formazione di vuoti a tergo.

Nel caso d'impiego di reti di armatura disposte su più strati, in relazione al diametro massimo degli aggregati, la distanza fra gli strati deve essere compresa fra 30 mm e 50 mm.

La proiezione deve assicurare la massima compattazione ed adesione al supporto mediante un'adeguata velocità di proiezione della miscela stessa in relazione alla distanza della lancia dal supporto stesso. La messa in opera deve avvenire dal basso verso l'alto per passate successive mantenendo la lancia possibilmente perpendicolare alla superficie.

Poiché il materiale è proiettato ad alta velocità contro la superficie da ricoprire, parte del materiale rimbalza (sfrido) e non aderisce alla parete. Le particelle grosse rimbalzano con maggiore facilità rispetto alle fini, lo sfrido è più elevato nel primo strato spruzzato e diminuisce negli strati successivi che sono spruzzati su una superficie di calcestruzzo relativamente plastica.

Valori tipici delle percentuali di sfrido sono:

- pavimentazione a piastre 5 ÷ 15%,
- pareti inclinate o verticali 15 ÷ 30%,
- soffitti 25 ÷ 50%.

Considerato che a causa dell'elevato rapporto superficie/volume esiste una notevole tendenza all'essiccazione, la stagionatura del calcestruzzo proiettato deve essere seguita e curata particolarmente: nei lavori all'aperto, in caso di forte ventilazione, nella riparazione di murature o rinforzo di vecchie strutture e quando è richiesta una perfetta adesione alla superficie d'applicazione.

5.7 Fessurazione del calcestruzzo in fase plastica

Nel calcestruzzo fresco in opera, nel periodo compreso tra la compattazione e l'inizio della presa - durante il quale per tempi variabili dell'ordine di alcune ore l'impasto rimane plastico - possono manifestarsi fenomeni fessurativi riconducibili:

- 1) all'assestamento differenziale delle particelle solide che sedimentano sotto l'azione del campo gravitazionale;
- 2) al ritiro plastico che si manifesta quando la velocità di evaporazione dell'acqua dalla superficie esposta dell'impasto è maggiore della velocità alla quale l'acqua essuda.

Il ritiro plastico è tipico degli elementi strutturali piani (lastre, solette, pavimentazioni). Non rappresenta invece alcun problema per i getti in forma chiusa nei quali la perdita di acqua per evaporazione è di poco conto.

L'assestamento in fase plastica dei solidi particellari e il ritiro plastico sono collegati, ma in diverso modo, all'essudazione (affioramento o accumulo) dell'acqua sulla superficie orizzontale dei getti.

L'essudazione di acqua (fenomeno noto anche con il nome di bleeding) può essere riguardata come:

- a) segregazione di acqua dal resto dell'impasto,

- b) drenaggio di acqua al di fuori dell'impasto,
- c) conseguenza della sedimentazione dei solidi particellari, incapaci di trattenere tutta l'acqua usata per l'impasto.

L'affioramento può avvenire in modo uniforme, interessando l'intera superficie esposta o può essere localizzato in un certo numero di canalicoli. In quest'ultimo caso, l'acqua trascina le particelle più fini di cemento che si depositano intorno alla bocca dei canalicoli formando piccoli crateri.

L'essudazione localizzata è tipica degli impasti poco coesivi, quindi degli impasti magri e/o ricchi di acqua.

Sia l'essudazione localizzata che il trascinarsi di notevoli quantità di particelle di cemento sono di pregiudizio per le proprietà della cosiddetta "pelle" del calcestruzzo. Nel caso di pelle facilmente polverizzabile, è raccomandato di eliminare lo strato polverulento mediante spazzolatura.

Generalmente l'acqua di essudazione che si forma sulla superficie del calcestruzzo è dannosa, può essere utile in alcune situazioni. E' di vantaggio nella finitura di una pavimentazione quando lubrifica gli utensili e per impedire che si crei una situazione d'incipiente fessurazione per ritiro plastico. Tuttavia se l'essudazione è eccessiva, il trattamento di finitura può provocare il richiamo in superficie di una sospensione finissima di cemento con conseguenze negative per le proprietà degli strati superficiali del calcestruzzo indurito.

L'essudazione di acqua del calcestruzzo fresco, può essere ridotta ricorrendo a uno o più dei seguenti accorgimenti:

- a) usando un cemento di maggiore superficie specifica
- b) sostituendo parte del cemento con una o più aggiunte minerali
- c) inglobando aria mediante aggiunta di un additivo aerante (le piccole bolle si comportano come aggregato fine elastico e perciò l'impasto si comporta come se contenesse un eccesso di sabbia fine)
- d) aumentando la velocità di idratazione del legante mediante aggiunta di un additivo accelerante. Così facendo aumenta la quantità di acqua che durante la fase plastica viene impegnata nelle reazioni di idratazione e, nel contempo, si riduce rapidamente l'"acqua libera" dell'impasto
- e) diminuendo il rapporto a/c
- f) aumentando il dosaggio di cemento e/o delle sole componenti fini (tendenzialmente sotto 0.5 mm) dell'aggregato

Il fenomeno dell'essudazione è caratterizzato dalla velocità intesa come volume d'acqua che affiora nell'unità di tempo e di superficie ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$) e dalla quantità, assestamento totale per unità di altezza del calcestruzzo. I due parametri possono essere determinati in cantiere (UNI 7122 Calcestruzzo fresco – determinazione della quantità d'acqua d'impasto essudata, UNI EN 12350 – 4 Prova sul calcestruzzo fresco – Indice di compattabilità).

5.7.1 Assestamento plastico

La velocità di assestamento del calcestruzzo è dell'ordine di alcune decine di milionesimi di centimetri al secondo e poiché la durata del processo è anche breve, il fenomeno sarebbe difficilmente osservabile se sulla superficie dell'impasto non apparisse un velo di acqua.

In pratica l'andamento della sedimentazione è modificato in senso differenziale dalla presenza:

- 1) di elementi fissi rappresentati dall'armatura orizzontale, staffe ed eventualmente dai bordi creati dai pannelli delle casseforme non perfettamente montati gli uni sugli altri
- 2) dalle variazioni brusche di sezione
- 3) dalla presenza di superfici inclinate
- 4) dalla interferenza dimensionale dell'aggregato grosso
- 5) dall'effetto parete.

Per questi motivi possono formarsi fessure o microfessure che seguono la direzione dei ferri sulla sommità di travi profonde e di lastre di grande spessore, nelle quali il rinforzo è tenuto rigidamente orizzontale, sulle superfici laterali dei pilastri in corrispondenza delle staffe e dei bordi di disallineamento in corrispondenza delle casseforme. [vedi *Figura 5.13* e *Figura 5.14*].

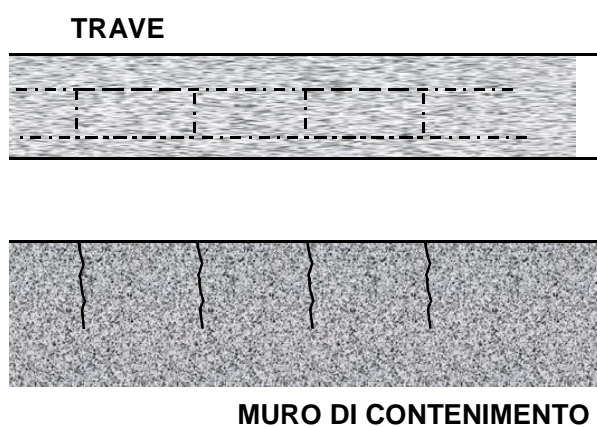


Figura 5.13: Fessure che seguono la direzione dei ferri sulla sommità di travi

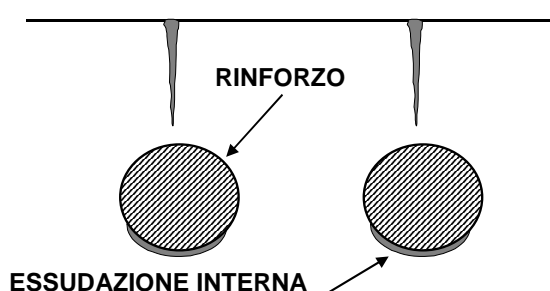


Figura 5.14: Essudazione interna per effetto delle armature

Nei pilastri di sezione ristretta, il calcestruzzo della sezione di testa tende ad autosostenersi in corrispondenza delle staffe e ciò può creare fessurazione ed inarcamento.

La fessurazione orizzontale spesso accompagnata da inarcamento e delaminazione della parte superiore del copriferro, può manifestarsi nelle lastre di superficie estesa quando l'armatura è costituita da ferri molto ravvicinati [Figura 5.15]. La probabilità di inarcamento e delaminazione aumenta al diminuire dello spacing (distanza) tra i ferri. Quando la lastra è soggetta a cicli di gelo/disgelo o a corrosione dell'armatura, processi entrambi di natura espansiva, è lecito ipotizzare un distacco inaspettato di gran parte del copriferro.

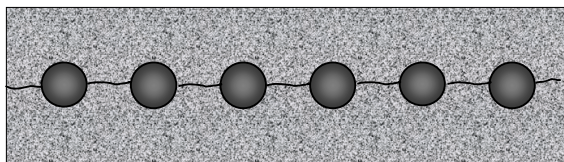


Figura 5.15: Fessurazione orizzontale dovuta a ferri molto ravvicinati

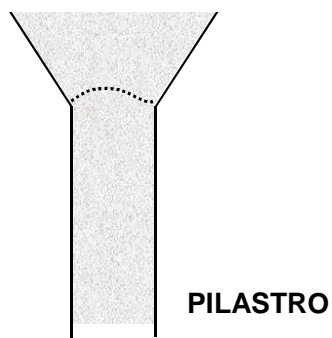


Figura 5.16: Inarcamento in corrispondenza dell'allargamento di sezione

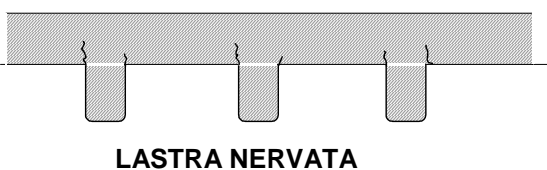


Figura 5.17: Nelle lastre nervate la fessurazione è dovuta all'assestamento differenziale dell'impasto.

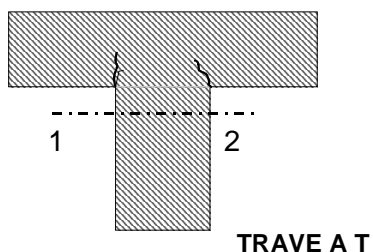


Figura 5.18: Nella trave a T è buona regola gettare dapprima la sezione 1-2

La fessurazione da assestamento plastico può collegarsi a brusche variazioni di sezione come nel caso dell'allargamento di sezione della testa di un pilastro ove l'inarcamento è provocato dal rallentamento sui piani inclinati della velocità di sedimentazione. [Figura 5.16].

Nelle lastre nervate la fessurazione è provocata dall'assestamento differenziale dell'impasto della soletta e delle nervature.

L'assestamento della soletta, essendo questa di spessore modesto, termina prima dell'assestamento dell'impasto in corrispondenza delle nervature [Figura 5.17].

Nel getto di una trave a T è buona regola gettare dapprima la sezione 1-2 [Figura 5.18] e quindi attendere che l'acqua affiori prima di completare il getto.

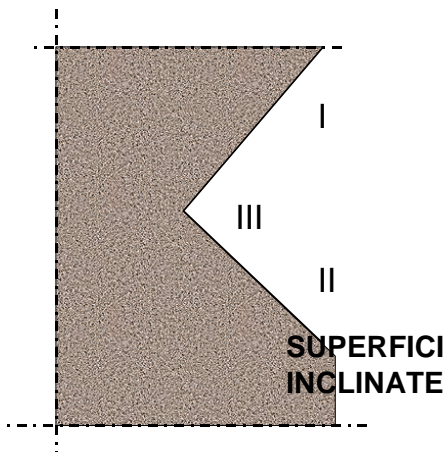


Figura 5.19: L'impasto tende ad addensarsi sulla parete I, a staccarsi nella posizione II ed a separare acqua nella posizione III

La presenza di piani inclinati dà luogo a maggiori gradienti di densità, alla formazione di microfessure e spesso a vuoti e cavità. Nella situazione illustrata dalla *Figura 5.19*, l'impasto tende ad addensarsi sulla parete I, a distaccarsi dalla parete II, a separare acqua nella posizione III dove si potrebbe anche avere fessurazione.

In un calcestruzzo l'aggregato grosso all'inizio si assesta senza vincoli, ma la caduta, a causa dell'interferenza dimensionale, si arresta prima che la sedimentazione delle particelle di cemento abbia avuto termine. Solitamente, la sedimentazione degli strati sottili di sospensione di particelle di

cemento - rimasti intrappolati tra e al di sotto dei granuli di aggregato grosso - procede fino al tempo dell'inizio presa cosicché, al di sotto degli elementi lapidei si raccoglie un velo d'acqua [vedi fig. 5.14 con essudazione interna dovuta alla presenza di armatura] – che può dare origine ad una microfessura o ad indebolimento del giunto pasta/aggregato. L'andamento del processo di assestamento è influenzato, a causa dell'effetto parete, anche dall'ampiezza della sezione trasversale del calcestruzzo.

I solidi particellari a contatto con le pareti della cassaforma incontrano nel loro movimento maggiore resistenza rispetto ai solidi interni che sono separati da strati molto sottili d'acqua. L'effetto decelerante dovuto alla presenza della parete è trasmesso alle particelle contigue e via via a quelle più interne e nel tempo le differenze di velocità dovrebbero annullarsi. Tuttavia, è prevedibile che all'aumentare dell'ampiezza della sezione o al diminuire dell'altezza dello strato di impasto, il materiale della zona centrale sedimenti prima di essere raggiunto dall'effetto decelerante delle pareti.

L'effetto parete è operante anche nei pilastri e muri profondi; in questi casi il processo di assestamento può essere governato più dalla larghezza che dall'altezza del manufatto.

I vincoli che causano fessurazione e microfessurazione da assestamento plastico differenziale non possono, per la gran parte, essere evitati perché intrinseci alla costruzione. Pertanto, il danno fessurativo può essere minimizzato o annullato migliorando la coesione dell'impasto o, in alternativa, rivibrando l'impasto dopo che ha avuto luogo l'assestamento iniziale, cioè dopo 30' – 60' dalla prima vibrazione.

Quanto descritto è sintetizzato nella figura 6.10 e nella tabella 6.3 annessa alla figura stessa.

5.7.2 Ritiro plastico

Si manifesta entro le prime ore (2-4) quando la velocità di evaporazione dell'acqua sulla superficie del getto è maggiore della velocità alla quale l'acqua essuda. Il pericolo di

fessurazione incombe dal momento in cui, con la scomparsa del velo liquido, la superficie del getto appare opaca.

Il ritiro plastico è quasi sempre accompagnato dalla formazione di fessure in quanto raramente la contrazione avviene in modo uniforme e d'altra parte entro le prime ore l'impasto è praticamente privo di estensibilità essendo la sua resistenza a trazione ancora troppo bassa.

Comunemente si formano fessure lineari corte – da alcuni centimetri a circa trenta – piuttosto larghe (2-3 mm), ma poco penetranti. Alla loro distribuzione contribuiscono la presenza del rinforzo e dei granuli di aggregato grosso in vicinanza della superficie, la dispersione non uniforme dell'aggregato grosso e ogni eventuale impedimento alla contrazione.

Le fessure possono essere distribuite casualmente a mappa, ma nelle lastre possono anche formarsi fessure parallele, con angolo di 45° circa rispetto agli spigoli, distanziati tra loro da 0.2 ad 1 metro [vedi Figura 5.20].

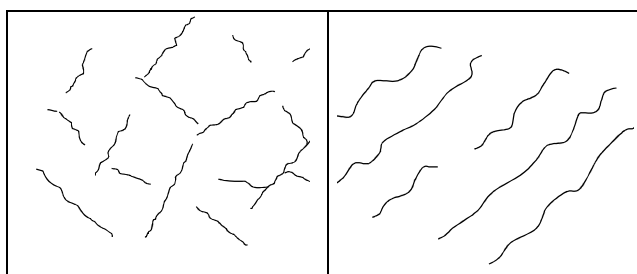


Figura 5.20: Tipici sviluppi delle fessure sulle superfici del calcestruzzo.

Quando il processo di essudazione è governato dalla velocità di evaporazione dell'acqua e la superficie del calcestruzzo diventa opaca, si forma una serie complessa di menischi con la concavità rivolta verso l'alto, cioè esposta all'aria. Al di sotto del lato convesso si generano pressioni capillari

negative che conducono alla formazione di una zona corticale addensata. Quando le forze capillari non sono più scaricate dal flusso plastico della pasta, l'impasto risulterà soggetto a compressione laterale, si contrae e, se la contrazione è impedita, si ha fessurazione.

Considerata la causa del fenomeno e la geometria degli elementi strutturali coinvolti, il rischio di fessurazione da ritiro plastico è particolarmente elevato se l'operazione di getto avviene in ambiente secco, ventoso e con la temperatura dell'impasto piuttosto alta. Il grafico della figura 5.21 permette di calcolare la velocità di evaporazione dell'acqua in funzione dei parametri climatici (temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, velocità del vento) e della temperatura del calcestruzzo. Si entra con la temperatura dell'aria, si risale al valore dell'umidità relativa, quindi si prosegue a destra fino alla temperatura dell'impasto. Dal punto così trovato si scende sulla velocità del vento. L'ordinata corrispondente al punto di intersezione rappresenta la velocità di evaporazione dell'acqua in kg/m²/h.

Se il valore trovato è intorno ad 1 kg/m²/h è opportuno prendere una o più delle precauzioni indicate qui di seguito. Non è possibile suggerire un valore critico della velocità di evaporazione dell'acqua perché, a volte, la perdita di acqua da una lastra soggetta a velocità di evaporazione di 0.5 kg/m²/h può risultare superiore alla velocità alla quale affiora l'acqua di essudazione.

Le precauzioni da prendere per evitare un rapido essiccamento della superficie di una lastra possono essere necessarie anche in una giornata ventosa invernale ricordando che l'aumento della velocità di vento di soli 10 km/h ha, un effetto essiccante quasi equivalente ad un aumento di temperatura di 10°C.

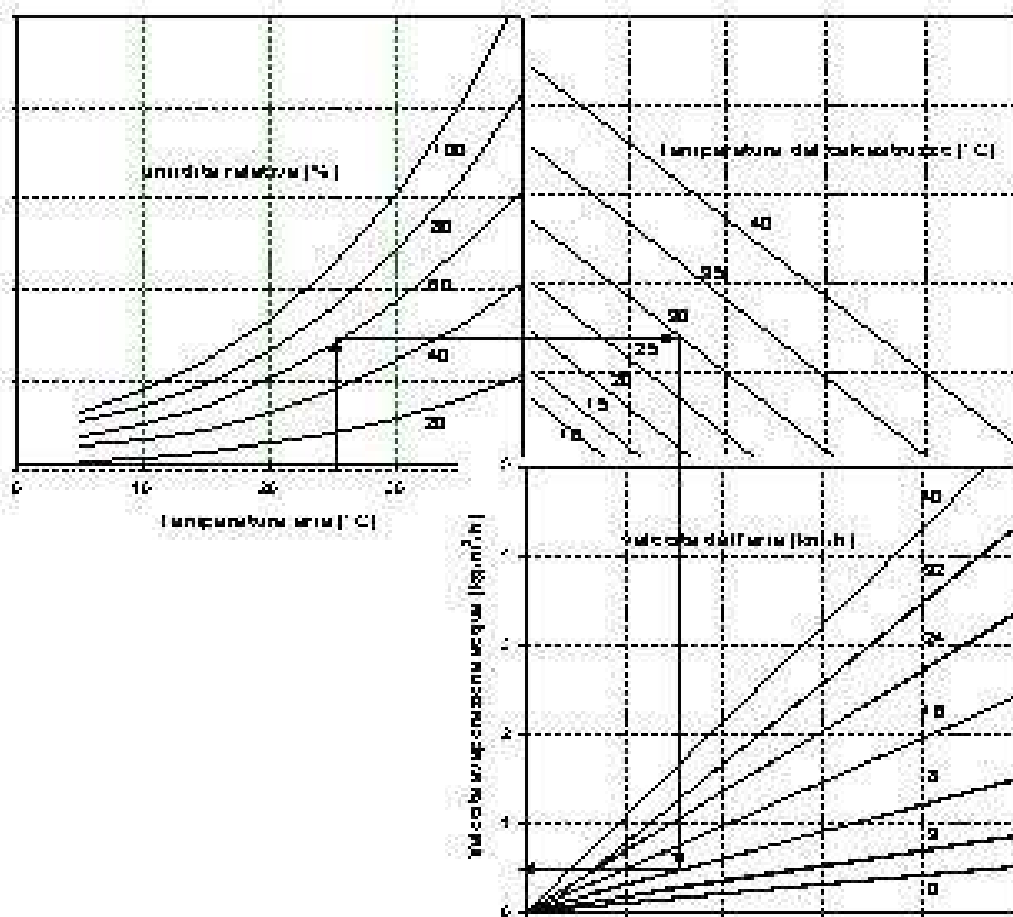


Figura 5.21: Diagramma per il calcolo della velocità di evaporazione dell'acqua da una superficie di calcestruzzo

Frequentemente l'essudazione è anche ridotta dall'assorbimento d'acqua da parte del letto di posa, da parte degli aggregati e/o delle casseforme.

Per evitare la fessurazione da ritiro plastico occorre prevenire o ridurre l'evaporazione dell'acqua entro i primi 30' – 60' dopo il getto prendendo uno o più dei seguenti provvedimenti:

- saturare gli aggregati, bagnare adeguatamente casseforme e terreno di posa
- nella stagione estiva mantenere bassa la temperatura dell'impasto
- ridurre l'intervallo di tempo tra la fine del getto e l'inizio delle procedure di stagionatura
- erigere barriere frangivento
- proteggere dall'insolazione (in condizioni critiche è opportuno programmare i tempi di lavoro in modo che il getto possa effettuarsi nel tardo pomeriggio o di sera)

- assicurarsi che la superficie del getto resti bagnata dopo la finitura fino a che non diventano applicabili le procedure di stagionatura (è raccomandato l'uso di teli bagnati, di fogli di plastica o di acqua nebulizzata).

6 Stagionatura e protezione del calcestruzzo

Dopo la messa in opera e la compattazione, il calcestruzzo deve essere stagionato e protetto dall'essiccamento in modo da:

- evitare l'interruzione dell'idratazione
- ridurre il ritiro in fase plastica e nella fase iniziale dell'indurimento ($1 \div 7$ gg)
- far raggiungere un'adeguata resistenza meccanica alla struttura
- ottenere un'adeguata compattezza e durabilità della superficie
- migliorare la protezione nei riguardi delle condizioni climatiche (temperatura, umidità, ventilazione)
- evitare vibrazioni, impatti, o danneggiamenti sia alla struttura che alla superficie, ancora in fase di indurimento.

La stagionatura comprende i processi durante i quali il calcestruzzo fresco sviluppa gradualmente le sue proprietà per effetto della progressiva idratazione del cemento. La velocità di idratazione dipende dalle condizioni climatiche d'esposizione e dalle modalità di scambio d'umidità e calore tra il calcestruzzo e l'ambiente.

Si definisce "ordinaria" la stagionatura del calcestruzzo che avviene a temperatura ambiente ($5 \div 35^{\circ}\text{C}$) con esclusione d'ogni intervento esterno di riscaldamento o raffreddamento. Per contro, si definisce stagionatura "accelerata" quella che si effettua con sistemi di maturazione ad alta temperatura e/o in particolari condizioni d'umidità e pressione. La stagionatura accelerata è utilizzata prevalentemente nella prefabbricazione, permette di ottenere rapidamente le resistenze operative necessarie a movimentare o installare i manufatti.

La presa e l'indurimento del calcestruzzo richiedono la disponibilità di un'idonea quantità d'acqua. L'acqua che è presente nel calcestruzzo fresco, all'atto del getto, deve rimanere disponibile fino a quando il volume iniziale dell'acqua e del cemento non è sostituito dai prodotti d'idratazione. L'idratazione del cemento progredisce solamente se la tensione di vapore dell'acqua contenuta nei pori è prossima al valore di saturazione ($UR \geq 90\%$). Gli impasti preparati con un basso contenuto in acqua, possono richiedere, nel corso della maturazione, un apporto esterno d'acqua.

La sensibilità del calcestruzzo nei riguardi della stagionatura dipende:

- dalla composizione: rapporto a/c, tipo e classe di cemento, qualità e quantità delle aggiunte e degli additivi; si ricordi che gli impasti preparati con cementi ad indurimento lento richiedono tempi di stagionatura umida più lunghi.
- dalla temperatura del calcestruzzo: la velocità d'indurimento a 35°C è doppia di quella che si sviluppa a 20°C che, a sua volta, è doppia di quella che si ha a 10°C .
- dalle condizioni ambientali esterne: umidità relativa, temperatura e velocità del vento.

Il tipico effetto dell'umidità relativa dell'ambiente sulla perdita d'acqua dal calcestruzzo, poco dopo il getto, è illustrato in figura 6-1 (i valori sono stati rilevati a temperatura dell'aria 21°C e velocità del vento 4,5 m/s).

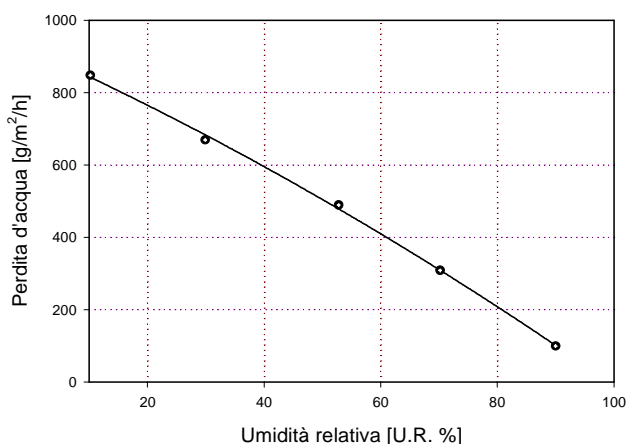


Figura 6-1: Perdita di acqua dalla superficie del calcestruzzo fresco per effetto dell'umidità relativa dell'ambiente (temperatura dell'aria 21°C; velocità del vento 4,5 m/s).

La durata della stagionatura "umida" condiziona lo sviluppo delle resistenze meccaniche : in figura 6.2 sono riportati gli andamenti delle resistenze meccaniche di provini maturati in diverse condizioni d'umidità. Si può rilevare che la resistenza dei provini esposti sempre all'aria è molto inferiore rispetto a quella degli stessi provini mantenuti in ambiente saturo d'umidità. La figura evidenzia anche come l'impropria stagionatura blocchi lo sviluppo della resistenza alle lunghe scadenze.

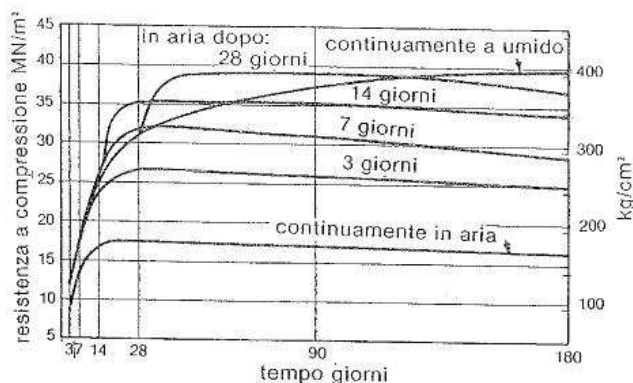


Figura 6-2: Influenza della stagionatura ad umido sulla resistenza del calcestruzzo (rapporto acqua/cemento = 0,5).

La temperatura elevata del calcestruzzo e dell'ambiente, favorisce, la perdita d'acqua dei getti per evaporazione ma aumenta la velocità di reazione e quindi il grado d'idratazione nel tempo del cemento.

In figura 6-3 è rappresentato il tipico effetto della temperatura dell'aria sulla perdita d'acqua del calcestruzzo fresco (giovane), con umidità relativa dell'aria 70% e velocità del vento 4,5 m/s.

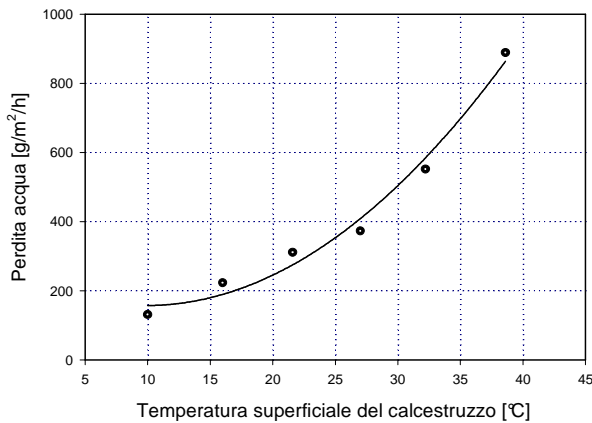


Figura 6-3: Perdita di acqua del calcestruzzo poco dopo il getto (umidità relativa dell'aria 70%; velocità del vento 4,5 m/s), per effetto della temperatura.

La temperatura elevata richiede una corretta stagionatura umida del getto, anche se i tempi necessari per raggiungere le resistenze prescritte sono più brevi. La temperatura di stagionatura elevata incrementa la resistenza meccanica a breve termine ma può penalizzare quella finale (a lungo termine), a causa di un'idratazione meno completa del cemento.

In condizioni di bassa temperatura lo sviluppo dell'indurimento è più lento e si richiedono quindi tempi di maturazione più lunghi.

Per ridurre gli effetti negativi causati dalla temperatura esterna o dagli eccessivi aumenti di temperatura dovuti alla reazione d'idratazione del cemento si può modificare la temperatura del calcestruzzo fresco, riscaldando o raffreddando i costituenti.

All'aperto, la ventilazione favorisce l'evaporazione dell'acqua dai getti freschi di calcestruzzo.

La figura 6-4 indica l'influenza della velocità del vento sulla perdita d'acqua dalla superficie del calcestruzzo.

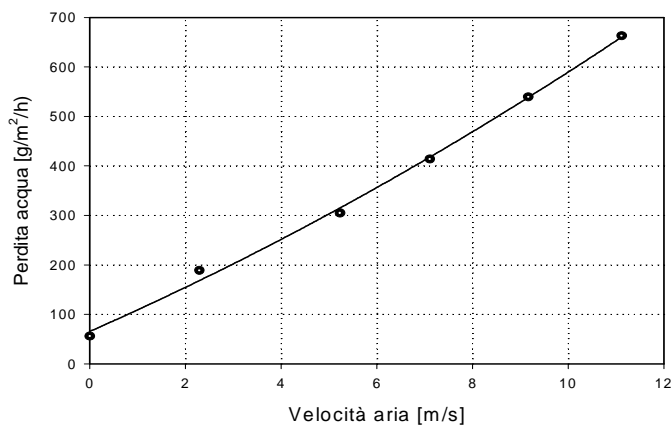


Figura 6-4: Perdita di acqua del calcestruzzo fresco (umidità relativa 70%; temperatura 21°C), per effetto della velocità del vento.

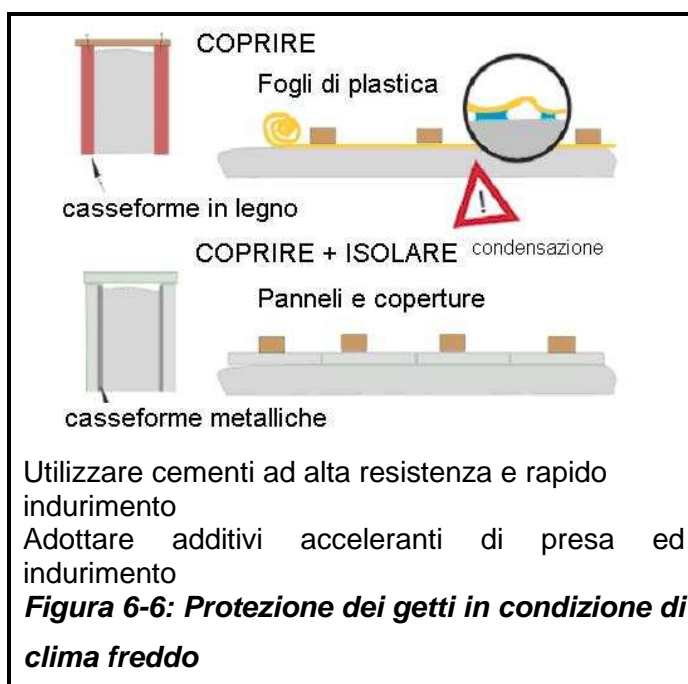
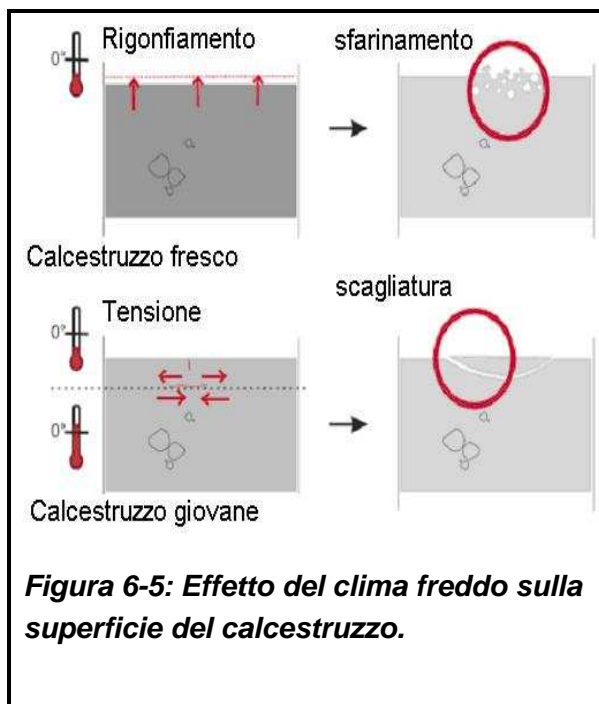
6.1 Getti in clima freddo

Si definisce "clima freddo" una condizione climatica in cui, per tre giorni consecutivi, si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

- la temperatura media dell'aria è inferiore a 5 °C
- la temperatura dell'aria non supera 10°C per più di 12 ore.

La figura 6-5 esemplifica i tipici effetti di una temperatura rigida sul calcestruzzo, rispettivamente per un calcestruzzo fresco ed uno giovane.

La figura 6-6 illustra alcuni tra i possibili sistemi di protezione dei getti nei climi freddi.



Prima del getto si deve verificare che tutte le superfici a contatto con il calcestruzzo siano a temperatura $\geq +5^{\circ}\text{C}$. La neve ed il ghiaccio, se presenti, devono essere rimossi immediatamente prima del getto dalle casseforme, dalle armature e dal fondo.

I getti all'esterno devono essere sospesi se la temperatura dell'aria è $\leq 0^{\circ}\text{C}$; tale limitazione non si applica nel caso di getti in ambiente protetto o qualora siano predisposti

opportuni accorgimenti approvati dalla Direzione Lavori (es. riscaldamento dei costituenti il calcestruzzo, riscaldamento dell'ambiente, etc...).

Il calcestruzzo deve essere protetto dagli effetti del clima freddo durante tutte le fasi di preparazione, movimentazione, messa in opera, maturazione.

Si consiglia di coibentare la cassaforma fino al raggiungimento della resistenza prescritta; in fase di stagionatura, si consiglia di ricorrere all'uso di agenti anti-evaporanti nel caso di superfici piane, o alla copertura negli altri casi, e di evitare ogni apporto d'acqua sulla superficie.

Gli elementi a sezione sottile messi in opera in casseforme non coibentate, esposti sin dall'inizio a basse temperature ambientali richiedono un'attenta e sorvegliata stagionatura. Nel caso in cui le condizioni climatiche portino al congelamento dell'acqua prima che il calcestruzzo abbia raggiunto una sufficiente resistenza alla compressione (5 N/mm^2), il conglomerato può danneggiarsi in modo irreversibile.

Il valore limite (5 N/mm^2) corrisponde ad un grado d'idratazione sufficiente a ridurre il contenuto in acqua libera e a formare un volume d'idrati in grado di ridurre gli effetti negativi dovuti al gelo.

Durante le stagioni intermedie e/o in condizioni climatiche particolari (alta montagna) nel corso delle quali c'è comunque possibilità di gelo, tutte le superfici del calcestruzzo vanno protette, dopo la messa in opera, per almeno 24 ore. La protezione nei riguardi del gelo durante le prime 24 ore non impedisce comunque un ritardo, anche sensibile, nell'acquisizione delle resistenze nel tempo.

Nella tabella seguente sono riportate le temperature consigliate per il calcestruzzo in relazione alle condizioni climatiche ed alle dimensioni del getto.

Dimensione minima della sezione [mm²]			
< 300	300 ÷ 900	900 ÷ 1800	> 1800
Temperatura minima del calcestruzzo al momento della messa in opera			
13 °C	10 °C	7 °C	5 °C
Massima velocità di raffreddamento per le superfici del calcestruzzo al termine del periodo di protezione			
1,15 °C/h	0,90 °C/h	0,70 °C/h	0,45 °C/h

Durante il "periodo freddo" la temperatura del calcestruzzo fresco messo in opera nelle casseforme non dovrebbe essere inferiore ai valori riportati in tabella. In relazione alla temperatura ambiente ed ai tempi di attesa e di trasporto si deve prevedere un raffreddamento di 2 – 5°C tra il termine della miscelazione e la messa in opera.

Durante il periodo freddo è rilevante l'effetto protettivo delle casseforme: ad esempio, quelle metalliche offrono una protezione efficace solo se sono opportunamente coibentate.

Al termine del periodo di protezione, necessario alla maturazione, il calcestruzzo deve essere raffreddato gradatamente per evitare il rischio di fessure provocate dalla differenza di temperatura tra parte interna ed esterna, La diminuzione di temperatura sulla superficie del calcestruzzo, durante le prime 24 ore, non dovrebbe superare i valori riportati in tabella. Si consiglia di allontanare gradatamente le protezioni facendo in modo che il calcestruzzo raggiunga gradatamente l'equilibrio termico con l'ambiente.

6.2 *Getti in clima caldo*

Il clima caldo influenza la qualità sia del calcestruzzo fresco, che di quello indurito. Infatti provoca una troppo rapida evaporazione dell'acqua di impasto ed una velocità di idratazione del cemento eccessivamente elevata. Le condizioni che caratterizzano il clima caldo sono:

- temperatura ambiente elevata
- bassa umidità relativa
- forte ventilazione (non necessariamente nella sola stagione calda)
- forte irraggiamento solare
- temperatura elevata del calcestruzzo.

I potenziali problemi per il calcestruzzo fresco riguardano:

- aumento del fabbisogno d'acqua
- veloce perdita di lavorabilità e conseguente tendenza a rapprendere nel corso della messa in opera
- riduzione del tempo di presa con connessi problemi di messa in opera, di compattazione, di finitura e rischio di formazione di giunti freddi
- tendenza alla formazione di fessure per ritiro plastico
- difficoltà nel controllo dell'aria inglobata.

I potenziali problemi per il calcestruzzo indurito riguardano:

- riduzione della resistenza a 28 giorni e penalizzazione nello sviluppo delle resistenze a scadenze più lunghe, sia per la maggior richiesta di acqua, sia per effetto del prematuro indurimento del calcestruzzo
- maggior ritiro per perdita di acqua
- probabili fessure per effetto dei gradienti termici (picco di temperatura interno e gradiente termico verso l'esterno)
- ridotta durabilità per effetto della diffusa micro-fessurazione
- forte variabilità nella qualità della superficie dovuta alle differenti velocità di idratazione
- maggior permeabilità.

Durante le operazioni di getto la temperatura dell'impasto non deve superare 35°C; tale limite dovrà essere convenientemente ridotto nel caso di getti di grandi dimensioni. Esistono diversi metodi per raffreddare il calcestruzzo; il più semplice consiste nell'utilizzo d'acqua molto fredda o di ghiaccio in sostituzione di parte dell' acqua d'impasto. Per ritardare la presa del cemento e facilitare la posa e la finitura del calcestruzzo si possono aggiungere additivi ritardanti, o fluidificanti ritardanti di presa, preventivamente autorizzati dalla Direzione Lavori.

6.3 Sviluppo di calore: getti di massa

La reazione d'idratazione del cemento è esotermica, conseguentemente la temperatura, specialmente nei getti di grosse dimensioni, nei quali il calore non si disperde rapidamente (condizioni quasi adiabatiche), può raggiungere valori elevati.

Prima l'innalzamento, poi la successiva diminuzione della temperatura, per effetto delle variazioni dimensionali impedito inducono tensioni di trazione e di compressione tra parti interne ed esterne dei getti, come è illustrato nelle figure 6-7 e 6-8.

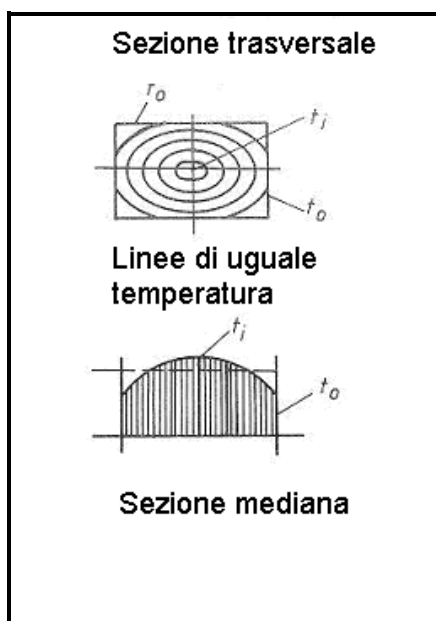


Figura 6-7: Distribuzione della temperatura dovuta al calore di idratazione

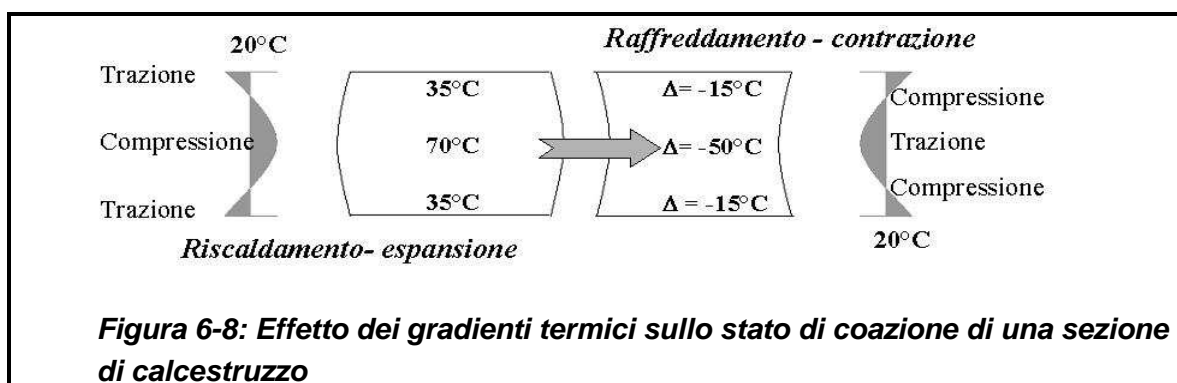


Figura 6-8: Effetto dei gradienti termici sullo stato di coazione di una sezione di calcestruzzo

Nel periodo iniziale, l'innalzamento termico provocato dall'idratazione, non produce tensioni elevate all'interno del calcestruzzo giacché il modulo elastico è ancora basso e le sollecitazioni sono compensate dalle deformazioni plastiche.

La velocità e l'intensità dello sviluppo di calore del calcestruzzo dipendono dal tipo, classe e dosaggio (kg/m^3) del cemento e dalla presenza di aggiunte attive (es.: ceneri, fumi di silice, loppa), dal dosaggio e natura degli altri costituenti e dalla temperatura iniziale dei materiali. L'innalzamento termico, a sua volta, dipende dalla possibilità di scambio termico del getto e dalle sue caratteristiche geometriche.

Il calore d'idratazione dei cementi, determinato in condizioni isoterme con il metodo per soluzione (UNI EN.196-8 Metodi per provare i cementi- parte 8 – Calore di idratazione – metodo per soluzione) ed in condizioni standard di laboratorio, può essere un utile elemento per stimare l'innalzamento termico del calcestruzzo (in condizioni adiabatiche). In tabella 6-1, sono riportati i valori indicativi del calore d'idratazione per differenti tipi di cemento e classi di resistenza.

	<i>Cemento: tipo e classe di resistenza</i>						
Tempo (giorni)	CEM VLH 22.5	CEM IV/B 32.5	CEM II/BS 32.5R	CEM II/A-LL 32.5R	CEM IV/A 42.5R	CEM II/A-LL 42.5R	CEM I 52.5R
3		200	225	255	275	285	315
7	210	240	270	300	300	330	355
28	240	275	310	335	315	355	380
90		295	365	360	340	380	400

Tabella 6-1: valori indicativi del calore d'idratazione [kJ/kg] di alcuni cementi, determinato con il metodo a soluzione. (UNI-EN 196-8 Metodi per provare i cementi – parte 8 – Calore di idratazione – metodo per soluzione)

NOTA: Il calore di idratazione determinato alla scadenza di 7 giorni è valore di riferimento per la classificazione dei cementi. Il cemento VLH 22.5 è il cemento a basso calore di idratazione (denominato, nelle vecchie norme, cemento per sbarramenti di ritenuta)

In condizioni quasi – adiabatiche la temperatura massima è raggiunta nel corso della prima settimana di maturazione (3 ÷ 7 giorni). I calcestruzzi a rapido sviluppo di resistenza ($R_2/R_{28} > 0.5$) sono più critici nei riguardi degli effetti secondari provocati dal calore d'idratazione.

L'effetto degli additivi (riduttori d'acqua, ritardanti di presa, acceleranti) si esaurisce nel corso delle prime 12 ÷ 16 ore dalla miscelazione e quindi non è rilevante nei riguardi dell'innalzamento termico dopo 3 – 7 giorni.

L'innalzamento termico in condizioni adiabatiche, in funzione dell'idratazione del cemento e del tempo di stagionatura, può essere stimato conoscendo le principali caratteristiche fisiche del cemento e del calcestruzzo, mediante la seguente relazione:

$$\Delta T = \frac{q_t \cdot c}{m \cdot \rho}$$

In cui: q_t = il calore d'idratazione unitario del cemento (kJ/kg)

c = dosaggio del cemento (kg/m³)

m = peso specifico (massa volumica) del calcestruzzo [2350 ÷ 2450] kg/m³

ρ = calore specifico del calcestruzzo [0.87 ÷ 1.08] kJ/kg°C

La temperatura massima raggiunta (picco termico) può essere stimata, in prima approssimazione, sommando alla temperatura iniziale del calcestruzzo fresco l'incremento termico dovuto all'idratazione del cemento, calcolato come sopra.

Per un cemento 42.5R il valore di q_t a 3 giorni è circa 280 KJ/Kg; ne consegue che, in un calcestruzzo dosato a 330 kg/m³, l'innalzamento termico è dell'ordine di:

$$\Delta T = \frac{280 \times 330}{2400 \times 0,97} \cong 40$$

Con una temperatura iniziale del calcestruzzo di 25°C, il picco termico raggiunge quindi 65°C.

Come regola pratica di cantiere si può assumere che ogni 100 kg/m³ di dosaggio in cemento di classe 42.5R (II A/L), provocano nel calcestruzzo un aumento di temperatura di ≈12°C mentre per un cemento 32.5R il medesimo dosaggio porta ad un incremento di ≈10°C.

La temperatura del calcestruzzo all'interno di un getto non dovrebbe superare 70°C; temperature superiori possono essere ammesse a condizione che siano verificati gli eventuali effetti collaterali sulle altre proprietà del calcestruzzo.

Per limitare le tensioni d'origine termica occorre:

1. controllare gli innalzamenti termici delle diverse parti della struttura, ponendo attenzione alla differenza di temperatura tra le diverse parti stesse
2. evitare/ridurre i vincoli esterni che impediscono le deformazioni.

È opportuno rispettare i seguenti limiti:

1. temperatura massima del calcestruzzo ≤ 70°C
2. $\Delta T_{\max} \leq 20^\circ\text{C}$ fra le varie parti della struttura
3. $\Delta T_{\max} \leq 15^\circ\text{C}$ in prossimità dei giunti di costruzione o nelle sezioni di dimensioni molto variabili.

Per limitare il rischio delle fessure superficiali, dovute agli effetti termici, è opportuno proteggere adeguatamente la struttura in modo da ridurre il ΔT fra l'interno e l'esterno. Particolare attenzione deve essere posta ai getti di grosse dimensioni, in cui l'inerzia termica della parte interna ed il rapido raffreddamento di quella esterna, può provocare stati di coazione. Il progettista e/o la Direzione Lavori possono prescrivere la verifica degli innalzamenti termici e dei gradienti termici in diversi punti di una sezione di calcestruzzo, facendo predisporre termocoppie all'interno delle casseforme ed opportuni interventi di coibentazione della struttura o di variazione della composizione del calcestruzzo.

6.4 Protezione termica durante la stagionatura

A titolo esemplificativo, di seguito sono descritti i più comuni sistemi di protezione termica adottabili nei getti di cantiere:

Cassaforma isolante

Il $\Delta t \leq 20^\circ\text{C}$ può essere rispettato se si usa una cassaforma isolante, es. legno compensato con spessore ≥2 cm, o se il getto si trova contro terra;

Sabbia e foglio di polietilene

La parte superiore del getto si può proteggere con un foglio di polietilene coperto con 7-8 cm di sabbia. Il foglio di polietilene ha anche la funzione di mantenere la superficie pulita e satura d'umidità;

Immersione in leggero strato d'acqua

La corretta stagionatura è assicurata mantenendo costantemente umida la struttura messa in opera. Nel caso di solette e getti a sviluppo orizzontale si suggerisce di creare un cordolo perimetrale che permette di mantenere la superficie costantemente ricoperta da alcuni centimetri d'acqua.

Occorre porre attenzione, in condizioni di forte ventilazione, alla rapida escursione della temperatura sulla superficie per effetto dell'evaporazione;

Coibentazione con teli flessibili

Sono ideali nelle condizioni invernali, in quanto permettono di trattenere il calore nel getto, evitando la dispersione naturale; si deve tener conto, tuttavia, che, nella movimentazione, le coperte possono essere facilmente danneggiate.

Al fine di assicurare alla struttura un corretto sistema di stagionatura in funzione delle condizioni ambientali, della geometria dell'elemento e dei tempi di scasseratura previsti, occorre prevedere ed eseguire in cantiere una serie di verifiche che assicurino l'efficacia delle misure di protezione adottate.

6.5 Durata della stagionatura

Con il termine "durata di stagionatura" s'intende il periodo che intercorre tra la messa in opera ed il tempo in cui il calcestruzzo ha raggiunto le caratteristiche essenziali desiderate. Per l'intera durata della stagionatura il calcestruzzo necessita d'attenzioni e cure affinché la sua maturazione possa avvenire in maniera corretta. La durata di stagionatura deve essere prescritta in relazione alle proprietà richieste per la superficie del calcestruzzo (resistenza meccanica e compattezza) e per la classe d'esposizione. Se la classe di esposizione prevista è limitata alle classi X0 e XC1, il tempo minimo di protezione non deve essere inferiore a 12 ore, a condizione che il "tempo di presa" sia inferiore a 5 ore e che la temperatura della superficie del calcestruzzo sia superiore a 5°C. Se il calcestruzzo è esposto a classi d'esposizione diverse da X0 o XC1 la durata di stagionatura deve essere estesa fino a quando il calcestruzzo ha raggiunto, sulla sua superficie, almeno il 50% della resistenza media, o il 70% della resistenza caratteristica, previste dal progetto.

Nella tabella seguente sono riportati, in funzione dello sviluppo della resistenza e della temperatura del calcestruzzo, la durata di stagionatura minima per calcestruzzi esposti a classi d'esposizione diverse da X0 e XC1.

Temperatura "t" della superficie del calcestruzzo °C	Durata minima della stagionatura (giorni)			
	Sviluppo della resistenza in base al rapporto $r = (f_{cm2}/f_{cm28})$			
	Rapido $r \geq 0.50$	Medio $0.50 < r \leq 0.30$	Lento $0.30 < r \leq 0.15$	Molto lento $r < .15$
$t \geq 25$	1.0	1.5	2.0	3
$25 > t \geq 15$	1.0	2.0	3.0	5

$15 > t \geq 10$	2.0	4.0	7.0	10
$10 > t \geq 5$	3.0	6.0	10	15

La velocità di sviluppo della resistenza “r” è calcolato in base al rapporto sperimentale della resistenza meccanica f_{cm} alla compressione determinata alla scadenza di 2 e 28 giorni.

Al tempo di maturazione specificato deve essere aggiunto l'eventuale tempo di presa eccedente le 5 ore.

Il tempo durante il quale il calcestruzzo rimane a temperatura $< 5^{\circ}\text{C}$ non deve essere computato come tempo di maturazione.

Tabella 6-2: durata di stagionatura minima per calcestruzzi esposti a classi d'esposizione diverse (da X0 a XC1)

L'indicazione circa la durata di stagionatura, necessaria ad ottenere la durabilità ed impermeabilità dello strato superficiale, non deve essere confusa con il tempo necessario al raggiungimento della resistenza prescritta per la rimozione delle casseforme ed i conseguenti aspetti di sicurezza strutturale.

Per limitare la perdita d'acqua per evaporazione si adottano i seguenti metodi:

- mantenere il getto nelle casseforme per un tempo adeguato (3 ÷ 7 gg)
- coprire la superficie del calcestruzzo con fogli di plastica, a tenuta di vapore, assicurati ai bordi e nei punti di giunzione
- mettere in opera coperture umide sulla superficie in grado di proteggere dalla essiccazione
- mantenere umida la superficie del calcestruzzo con l'apporto di acqua
- applicare prodotti specifici (filmogeni antievaporanti) per la protezione delle superfici.

I prodotti filmogeni di protezione “curing” non possono essere applicati lungo i giunti di costruzione, sulle riprese di getto o sulle superfici che devono essere trattate con altri materiali, a meno che il prodotto non venga completamente rimosso prima delle operazioni o che si sia verificato che non ci siano effetti negativi nei riguardi dei trattamenti successivi, salvo specifica deroga da parte della Direzione Lavori. Per eliminare il film dello strato protettivo dalla superficie del calcestruzzo si può utilizzare la sabbiatura o l'idropulitura con acqua in pressione. La colorazione del prodotto di “curing” serve a rendere visibili le superfici trattate. Si devono evitare, nel corso della stagionatura, i ristagni d'acqua sulle superfici che rimarranno a vista.

Nel caso in cui siano richieste particolari caratteristiche per la superficie del calcestruzzo, quali la resistenza all'abrasione o durabilità, è opportuno aumentare il tempo di protezione e maturazione.

6.6 Prescrizioni per una corretta stagionatura

Per una corretta stagionatura del calcestruzzo è necessario seguire le seguenti disposizioni:

Prima della messa in opera:

- Si dovrà saturare a rifiuto il sottofondo e le casseforme di legno oppure isolare il sottofondo con fogli di plastica e impermeabilizzare le casseforme con disarmante
- La temperatura del calcestruzzo al momento della messa in opera deve essere $\leq 30^{\circ}\text{C}$, raffreddando, se necessario, gli aggregati e l'acqua di miscela.

Durante la messa in opera:

- Erigere temporanee barriere frangivento per ridurre la velocità sulla superficie del calcestruzzo
- Erigere protezioni temporanee contro l'irraggiamento diretto del sole
- Proteggere il calcestruzzo con coperture temporanee, quali fogli di polietilene nell'intervallo fra la messa in opera e la finitura
- Ridurre il tempo fra la messa in opera e l'inizio della stagionatura protetta.

Dopo la messa in opera:

- Minimizzare l'evaporazione proteggendo il calcestruzzo immediatamente dopo la finitura con membrane impermeabili, umidificazione a nebbia o copertura
- La massima temperatura ammissibile all'interno delle sezioni è di 70°C
- La differenza massima di temperatura fra l'interno e l'esterno è di 20°C
- La massima differenza di temperatura fra il calcestruzzo messo in opera e le parti già indurite o altri elementi della struttura è di 15°C .

E' compito della Direzione Lavori specificare le modalità di ispezione e di controllo.

7 Disarmo

Il disarmo comprende le fasi che riguardano la rimozione delle casseforme e delle strutture di supporto; queste non possono essere rimosse prima che il calcestruzzo abbia raggiunto la resistenza sufficiente a:

- sopportare le azioni applicate
- evitare che le deformazioni superino le tolleranze specificate
- resistere ai deterioramenti di superficie dovuti al disarmo.

Durante il disarmo è necessario evitare che la struttura subisca colpi, sovraccarichi e deterioramenti.

I carichi sopportati da ogni centina devono essere rilasciati gradatamente, in modo tale che gli elementi di supporto contigui non siano sottoposti a sollecitazioni brusche ed eccessive.

La stabilità degli elementi di supporto e delle casseforme deve essere assicurata e mantenuta durante l'annullamento delle reazioni in gioco e lo smontaggio. La procedura di puntellatura e di rimozione dei puntelli è bene sia oggetto di un'apposita nota progettuale (di Capitolato o della Direzione Lavori) in cui dovrà essere specificato come procedere al fine di ridurre ogni rischio per l'incolumità di persone e cose ed ottenere le prestazioni attese. Il disarmo deve avvenire gradatamente adottando i provvedimenti necessari ad evitare brusche sollecitazioni ed azioni dinamiche. Infatti, l'eliminazione di un supporto dà luogo, nel punto di applicazione, ad una repentina forza uguale e contraria a quella esercitata dal supporto (per carichi verticali, si tratta di forze orientate verso il basso, che danno luogo ad impropri aumenti di sollecitazione delle strutture). Il disarmo non deve avvenire prima che la resistenza del conglomerato abbia raggiunto il valore necessario in

relazione all'impiego della struttura all'atto del disarmo, tenendo anche conto delle altre esigenze progettuali e costruttive.

Si può procedere alla rimozione delle casseforme dai getti solo quando è stata raggiunta la resistenza indicata dal progettista e comunque non prima dei tempi prescritti nei decreti attuativi della Legge n° 1086/71; in ogni caso il disarmo deve essere autorizzato e concordato con la Direzione Lavori.

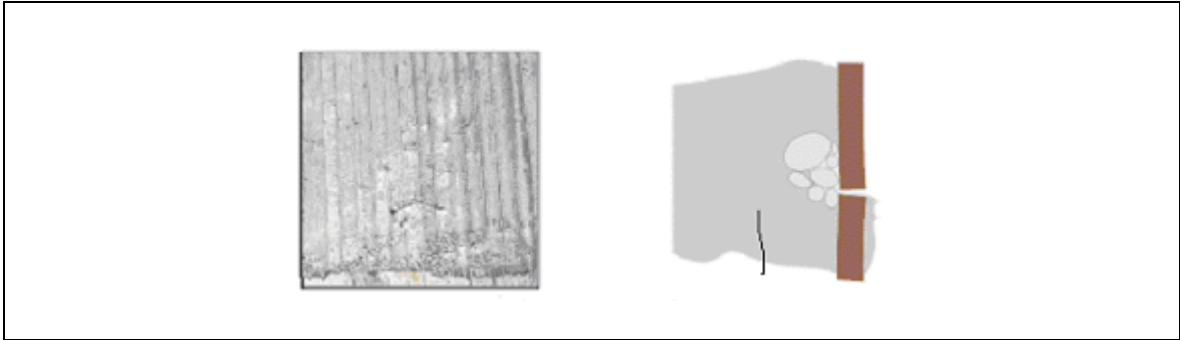
Si deve porre attenzione ai periodi freddi, quando le condizioni climatiche rallentano lo sviluppo delle resistenze del calcestruzzo, come pure al disarmo ed alla rimozione delle strutture di sostegno delle solette e delle travi. In caso di dubbio, è opportuno verificare la resistenza meccanica reale del calcestruzzo.

8 Difetti superficiali, cause e rimedi

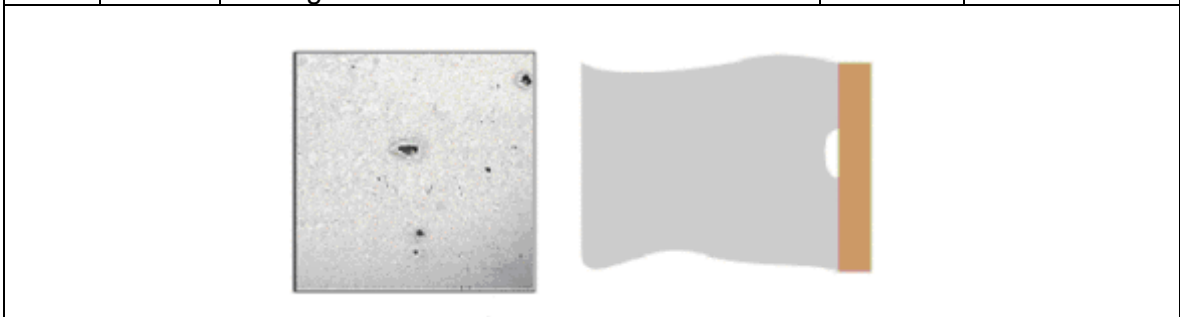
I difetti superficiali del calcestruzzo influenzano non solo le sue caratteristiche estetiche, ma anche quelle di durabilità.

I più frequenti difetti superficiali sono riportati nei seguenti prospetti, con le indicazioni relative alle cause ed ai rimedi.

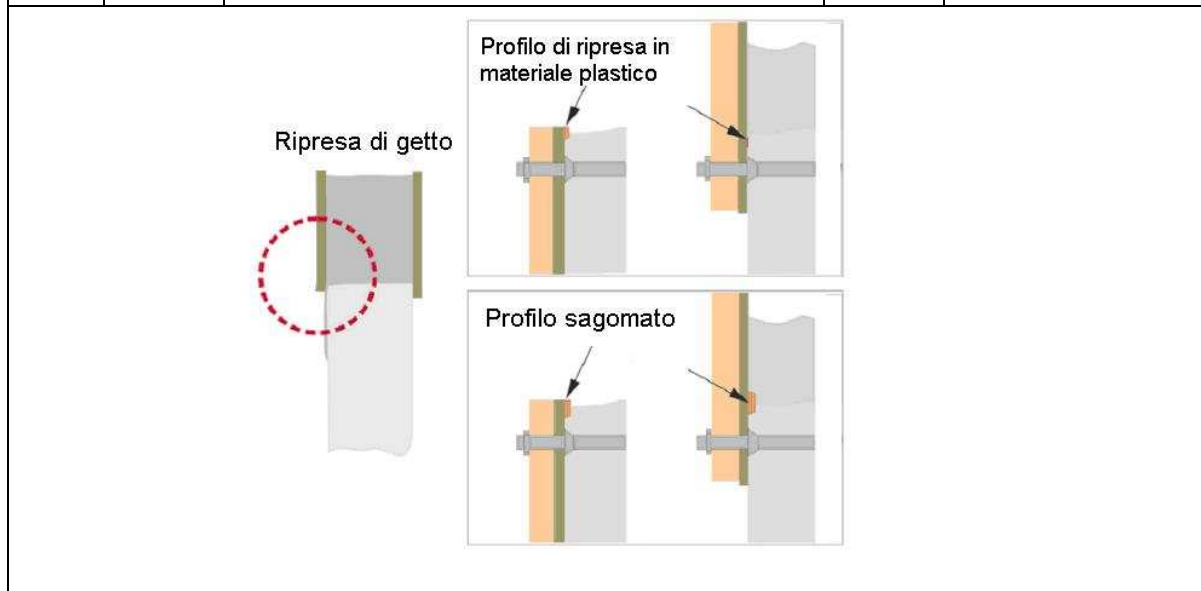
Tipo di difetto		Nidi di ghiaia	
	Descrizione	Presenza d'aggregato grosso non ricoperto da malta cementizia.	
	cause	rimedi	
	<u>progettuali</u> : sezione con forte congestione dei ferri di armatura, mancanza di spazio per l'introduzione dei vibratorii.		adeguare disposizione armature
	<u>casseforme</u> : giunti non a tenuta, che permettono la fuoriuscita di acqua o boiaccia o malta.		adeguare casseforme
	<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : carenza di fini, scarsa lavorabilità o eccesso d'acqua, indurimento anticipato, diametro massimo degli aggregati grande in relazione alle dimensioni del getto.		correggere miscela
	<u>messa in opera</u> : calcestruzzo lasciato cadere da una altezza eccessiva, carico eccessivo di calcestruzzo nelle casseforme. Tramogge di carico inesistenti o inefficaci, spostamento orizzontale del calcestruzzo.		corretta messa in opera
	<u>compattazione</u> : vibratorii sotto dimensionati per potenza, frequenza o ampiezza, tempo di vibrazione troppo breve o eccessivo, distanza eccessiva tra i punti di vibrazione, numero di vibratorii insufficienti		Corretto uso dei vibratorii



Tipo di difetto		Vuoti sulla superficie del getto contro cassaforma.	
descrizione	Cavità singole sulla superficie di forma irregolare, e dimensione fino a 20 mm.		
cause	<u>progettuali</u> : superfici di getto in contropendenza o con interferenze	rimedi	
	<u>casseforme</u> : superfici delle casseforme impermeabili, poco bagnabili, troppo flessibili, agente disarmante inadeguato		adeguare disarmante
	<u>condizioni operative</u> : agente disarmante applicato in misura eccessiva o non nebulizzato, temperatura del calcestruzzo troppo elevata.		correggere applicazione disarmante
	<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : sabbia troppo ricca in fini. Lavorabilità inadeguata, dosaggio eccessivo in cemento o materiale pozzolanico, contenuto d'aria troppo alto. (calcestruzzo troppo viscoso)		correggere la miscela
	<u>messa in opera</u> : messa in opera del calcestruzzo discontinua o troppo lenta. Inadeguata portata della pompa o delle tubazioni.		assicurare continuità del getto
	<u>compattazione</u> : ampiezza di vibrazione eccessiva, vibratore mantenuto fermo e/o parzialmente immerso, vibrazione esterna inadeguata.		correggere metodo di vibrazione



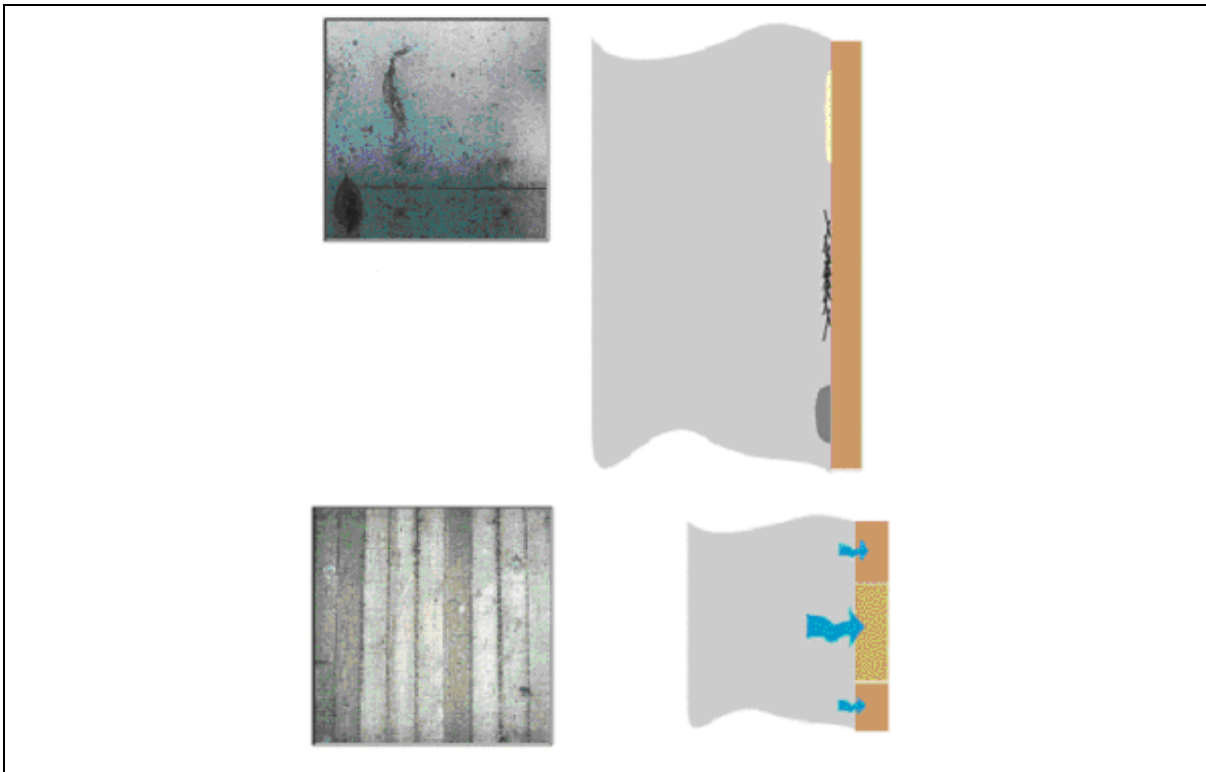
tipo di difetto		Giunti delle casseforme in evidenza		
descrizione	Superfici dei giunti con evidenza d'aggregati fini o grossi carenti in cemento, generalmente delimitati da superfici colorate in scuro.			
	cause	<u>casseforme</u> : mancanza di tenuta nei giunti delle casseforme o nei raccordi di fissaggio, con sigillatura inadeguata.	rimedi	adeguare casseforme
		<u>condizioni operative</u> : spostamento laterale del calcestruzzo.		correggere metodo di messa in opera
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : eccesso di acqua, calcestruzzo troppo fluido, e/o carenti in pasta cementizia		adeguare miscela
		<u>messa in opera</u> : tempo di attesa eccessivo tra la posa del calcestruzzo e la compattazione.		assicurare continuità del getto
<u>compattazione</u> : eccessiva ampiezza o frequenza della vibrazione in relazione alla dimensione delle casseforme.	correggere vibrazione			



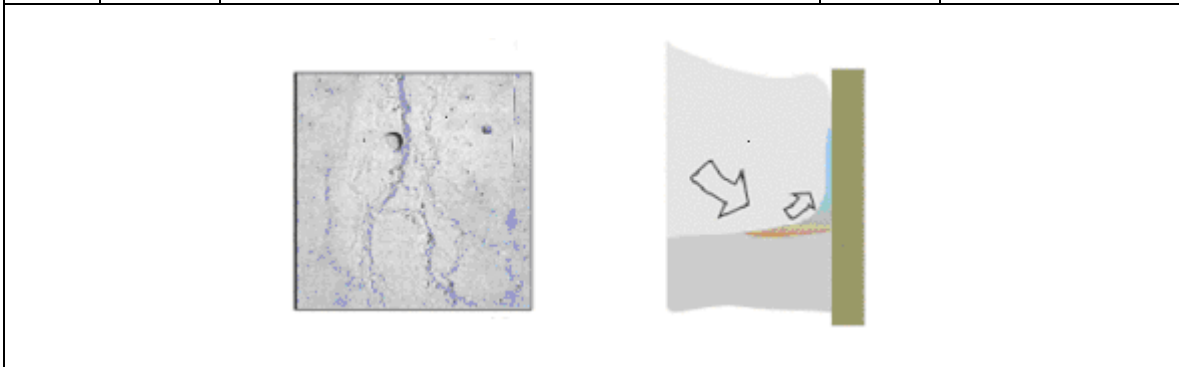
tipo di difetto		Aggregati affioranti sulla superficie del calcestruzzo a vista		
descrizione	Superfici chiazzate di chiaro o di scuro, presenza di macchie aventi dimensioni simili a quelle dell'aggregato			
	cause	<u>casseforme</u> : troppo flessibili.	rimedi	adeguare casseforme
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : aggregati carenti nel contenuto in fini, granulometria non corretta, aggregato leggero con calcestruzzo troppo fluido.		adeguare miscela
<u>compattazione</u> : vibrazione esterna eccessiva, o vibrazione eccessiva di calcestruzzo leggero.	correggere sistema di vibrazione			

tipo di difetto		Fessure di assestamento		
	descrizione	Fessure anche corte d'ampiezza variabile disposte orizzontalmente.		
	cause	rimedi	<u>progettuali</u> : elementi sottili e complessi con difficoltà di accesso per il calcestruzzo e vibrator, spessore del copriferro inadeguato	adeguare/verificare geometria
<u>casseforme</u> : casseforme inadeguate e dalle superfici ruvide			adeguare casseforme	
<u>condizioni operative</u> : discontinuità nelle operazioni di getto con tempi eccessivi durante la messa in opera del calcestruzzo (esempio: tra le colonne ed i solai o le travi)			assicurare continuità del getto	
<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : composizione granulometrica inadeguata, calcestruzzo troppo fluido. Cemento con presa troppo rapida.			verificare miscela	
<u>messa in opera</u> : discontinua			continuità di getto	
<u>compattazione</u> : vibrazione insufficiente o mal eseguita			adeguare vibrazione	

tipo di difetto		Variazioni di colore		
	descrizione	Variazioni di colore sulla superficie in evidenza poche ore dopo la rimozione delle casseforme.		
	cause	rimedi	<u>progettuali</u> : ferri di armatura molto vicini alle casseforme.	adeguare copriferro
<u>casseforme</u> : variazioni nelle proprietà di assorbimento superficiale, reazione fra il calcestruzzo e la superficie della cassaforma, reazione con l'agente disarmante, perdita di boiacca in corrispondenza dei giunti.			correggere casseforme	
<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : granulometria inadeguata degli aggregati, miscelazione non completa, calcestruzzo troppo scorrevole, vibrazione eccessiva.			adeguare miscela	
<u>messa in opera</u> : segregazione dei costituenti, consistenza troppo fluida.			aggiustare consistenza	
<u>compattazione</u> : vibrazione ad immersione troppo prossima alle casseforme, vibrazione a cassaforma eccessiva.			correggere vibrazione	



tipo di difetto		Striature di sabbia/acqua		
descrizione	Variazioni di colore od ombre dovute alla separazione di particelle fini.			
	cause	<u>casseforme</u> : mancanza di tenuta delle casseforme, acqua in eccesso sul fondo della cassaforma risalente durante il getto.	rimedi	adeguare casseforme, drenare/asciugare acqua
		<u>condizioni operative</u> : temperatura bassa, calcestruzzo con eccesso di acqua.		adottare protezione casseforme
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : scarso od eccessivamente ricco di fini, miscela arida, con insufficiente contenuto di pasta.		adeguare miscela
		<u>messa in opera</u> : troppo veloce		correggere messa in opera
		<u>compattazione</u> : vibrazione e/o ampiezza di vibrazione eccessive.		adeguare vibrazione



tipo di difetto		Delimitazione degli strati		
	descrizione	Zone di colore scuro tra gli strati nel calcestruzzo.		
	cause	<u>casceforme</u> : troppo deformabili	rimedi	
		<u>condizioni operative</u> : temperatura troppo elevata, mancanza di continuità nella posa del calcestruzzo e riprese di getto "a freddo".		irrigidire le casceforme
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : troppo bagnato con tendenza all'essudamento, rapida presa		adeguare mantenimento lavorabilità
		<u>messa in opera</u> : troppo lenta, attrezzature o mano d'opera inadeguate.		adeguare miscela
		<u>compattazione</u> : carenze nella vibrazione, difetto di penetrazione dei vibratorii attraverso gli strati.		correggere messa in opera
			adeguare vibrazione	

tipo di difetto		Giunti freddi		
	descrizione	Vuoti, nidi di ghiaia, variazioni di colore ai bordi delle riprese, bordo superiore del calcestruzzo non connesso allo strato inferiore		
	cause	<u>Progettuali</u> : spazio insufficiente per inserire il vibratore	rimedi	
		<u>condizioni operative</u> : mancanza di coordinamento fra la messa in opera e la compattazione o sistema di vibrazione inadeguato, messa in opera quando lo strato inferiore del calcestruzzo ha iniziato ad indurire		adeguamento sistemi di vibrazione
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : elevata perdita di lavorabilità ed indurimento troppo rapido.		continuità della messa in opera e vibrazione
		<u>messa in opera</u> : strati troppo profondi, tempi di attesa eccessivi nella messa in opera dei vari strati.		migliorare miscela
		<u>compattazione</u> : vibrazione insufficiente, impossibilità di conferire continuità al getto inserendo il vibratore negli strati contigui, mancato inserimento dei vibratorii nello strato sottostante.		adeguare procedure di esecuzione
			adeguare vibrazione	

tipo di difetto		Marcatura delle casseforme		
descrizione	Irregolarità sulla superficie, in corrispondenza delle giunzioni delle casseforme, o come conseguenza di difetti delle casseforme.			
	cause	<u>progettuali</u> : giunti di costruzione in corrispondenza di una variazione nella direzione delle casseforme	rimedi	
		<u>casseforme</u> : inadeguate al tipo di getto (dimensioni del getto, pressione sulle casseforme) e di messa in opera. Facilmente deformabili.		adeguare casseforme
		<u>condizioni operative</u> : sistema di ancoraggio delle casseforme inadeguato, eccessivo accumulo di calcestruzzo prima della sua distribuzione.		correggere sistema di ancoraggio e procedure di getto
		<u>proprietà del calcestruzzo fresco</u> : eccessivo ritardo nell'indurimento del calcestruzzo		migliorare miscela
		messa in opera: troppo lenta		accelerare messa in opera
		<u>compattazione</u> : ampiezza di vibrazione eccessiva, disomogenea distribuzione dei punti di immersione dei vibratori		adeguare vibrazione

9 Difetti fessurativi, cause e rimedi

La non corretta progettazione ed esecuzione di una costruzione, o di un elemento strutturale, può essere causa di fessurazioni che possono limitare sia la capacità portante della struttura sia la sua durabilità.

La fessurazione si manifesta ogni volta che lo sforzo di trazione supera la resistenza a trazione del calcestruzzo.

La capacità di deformazione a trazione del calcestruzzo e la relativa resistenza a trazione dipendono, fra l'altro, anche dall'età e dalla velocità d'applicazione del carico.

I principali meccanismi che inducono deformazioni nel calcestruzzo sono:

1. Movimenti intrinseci del calcestruzzo quali il ritiro igrometrico (dovuto all'evaporazione dell'acqua nel calcestruzzo indurito), il ritiro o la sedimentazione allo stato plastico (indotto nel calcestruzzo fresco dalla stagionatura impropria, dalla composizione inadeguata della miscela o dalla errata disposizione delle armature). Queste deformazioni "potenziali" inducono sforzi di trazione solo se il movimento della struttura è impedito; possono essere locali quando il movimento del calcestruzzo è impedito dall'armatura, ed estese ad un intero elemento strutturale quando allo stesso elemento è impedito di ritirarsi poiché vincolato esternamente.
2. Espansione di materiale inglobato nel calcestruzzo, ad esempio la corrosione delle armature.
3. Condizioni esterne quali carichi o deformazioni dovute per esempio a cedimenti differenziali delle fondazioni.

10 Controllo del calcestruzzo in opera

Le "Nuove Norme tecniche per le Costruzioni" (D.M. 14.01.2008) prevedono esplicitamente (p.11.2.5) l'effettuazione di un controllo di accettazione del calcestruzzo in relazione alla resistenza caratteristica a compressione prescritta. Qualora i valori di resistenza a compressione dei provini prelevati durante il getto non soddisfino i criteri di accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, o qualora sorgano dubbi sulla qualità del calcestruzzo, è facoltà del Direttore dei Lavori richiedere l'effettuazione di prove direttamente sulle strutture. In questi casi si dovrà tenere nel debito conto gli effetti che sui prelievi in opera hanno avuto la posa in opera e la stagionatura del calcestruzzo, per tale ragione la verifica od il prelievo del calcestruzzo indurito non può essere sostitutivo dei controlli d'accettazione da eseguirsi su provini prelevati e stagionati in conformità alle relative norme UNI.

La conformità della resistenza non implica necessariamente la conformità nei riguardi della durabilità o di altre caratteristiche specifiche del calcestruzzo messo in opera, analogamente la non conformità della resistenza valutata in una posizione non implica la non conformità di tutto il calcestruzzo messo in opera.

La stima della resistenza *in situ* dalla struttura può essere richiesta anche ai fini della valutazione della sicurezza di edifici esistenti, per esempio quando ricorra uno dei seguenti casi:

- Riduzione evidente della capacità resistente di elementi strutturali;
- Azioni ambientali (sisma, vento, neve e temperatura) che abbiano compromesso la capacità resistente della struttura;
- Degrado e decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali (in relazione alla durabilità dei materiali stessi);
- Verificarsi di azioni eccezionali (urti, incendi, esplosioni) significative e di situazioni di funzionamento ed uso anomalo;
- Distorsioni significative imposte da deformazioni del terreno di fondazione;
- Provati errori di progetto o esecuzione;
- Cambio della destinazione d'uso della costruzione o di parti di essa, con variazione significativa dei carichi variabili;

- Interventi non dichiaratamente strutturali (es. impiantistici, di redistribuzione degli spazi, ecc.) qualora essi interagiscano, anche solo in parte, con elementi aventi funzione strutturale.

Le modalità d'indagine, ovviamente, si diversificano a seconda che sia necessario:

- stimare la stabilità di una intera struttura,
- determinare la qualità di singoli elementi,

In ogni caso, il numero di campioni prelevati dipende:

- dal grado di fiducia che si intende affidare alla stima della resistenza,
- dalla variabilità dei dati o risultati che si presume di ottenere.

10.1 Pianificazione delle prove in opera

Le aree di prova, da cui devono essere estratti i campioni o sulle quali saranno eseguite le prove, devono essere scelte in modo da permettere la valutazione della resistenza meccanica della struttura o di una sua parte interessata all'indagine. Le aree ed i punti di prova debbono essere preventivamente identificati e selezionati in relazione agli obiettivi. La dimensione e la localizzazione dei punti di prova dipendono dal metodo prescelto, mentre il numero di prove da effettuare dipende dall'affidabilità desiderata nei risultati.

La definizione e la divisione in regioni di prova, di una struttura, presuppongono che i prelievi o i risultati di una regione appartengano statisticamente e qualitativamente ad una medesima popolazione di calcestruzzo. Nella scelta dei siti di prelievo o di prova, si deve tener conto che in ogni struttura, eseguita con getto continuo, la resistenza del calcestruzzo in opera diminuisce progressivamente dal basso verso l'alto.

Nel caso in cui si voglia valutare la capacità portante di una struttura, le regioni di prova devono essere concentrate nelle zone più sollecitate dell'edificio, mentre nel caso in cui si voglia valutare il tipo o l'entità di un danno, le regioni di prova devono essere concentrate nelle zone dove si è verificato il danno o si suppone sia avvenuto; in quest'ultimo caso, per poter effettuare un confronto, è opportuno saggiare anche una zona non danneggiata.

10.2 Predisposizione delle aree di prova

Le aree e le superfici di prova vanno predisposte in relazione al tipo di prova che s'intende eseguire, facendo riferimento al fine cui le prove sono destinate, alle specifiche norme UNI, e alle indicazioni del produttore dello strumento di prova.

In linea di massima e salvo quanto sopra indicato, le aree di prova devono essere prive sia di evidenti difetti (vespai, vuoti, occlusioni, ...) che possano inficiare il risultato e la significatività delle prove stesse sia di materiali estranei al calcestruzzo (intonaci, collanti, impregnanti, ...), sia di polvere ed impurità in genere.

L'eventuale presenza di materiale estraneo e/o di anomalie sulla superficie deve essere registrata sul verbale di prelievo e/o di prova.

In relazione alla finalità dell'indagine, i punti di prelievo o di prova possono essere localizzati in modo puntuale, per valutare le proprietà di un elemento oggetto d'indagine, o casuale, per valutare una partita di calcestruzzo indipendentemente dalla posizione.

In quest'ultimo caso il campionamento dovrebbe essere organizzato in modo da stimare tutta la "popolazione" del calcestruzzo costituente il lotto.

Dal numero di carote estratte o di misure non distruttive effettuate, dipende la significatività della stima della resistenza.

Nella tabella seguente sono riportati, in maniera sintetica ed a scopo esemplificativo, i vantaggi e gli svantaggi dei più comuni metodi d'indagine.

Metodo di prova	Costo	Velocità di esecuzione	Danno apportato alla struttura	Rappresentatività dei dati ottenuti	Qualità della Correlazione fra la grandezza misurata e la resistenza
Carotaggio	Elevato	Lento	Moderato	Moderata	Ottima
Indice di rimbalzo	Molto basso	Veloce	Nessuno	Interessa solo la superficie (1)	Debole
Velocità di propagazione di ultrasuoni	Basso	Veloce	Nessuno	Buona Riguarda tutto lo spessore	Moderata (2)
Estrazione di inserti	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Buona
Resistenza alla penetrazione	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Moderata

(1) Inoltre, la singola determinazione è influenzata dallo stato della superficie dell'area di prova (umidità, carbonatazione,...),

(2) La misura si correla bene con il modulo elastico del materiale, la bontà della correlazione, tra modulo elastico e resistenza meccanica, può dipendere dalle caratteristiche del conglomerato.

I metodi più semplici e che arrecano il minor danno alle superfici delle strutture, quali l'indice di rimbalzo e la velocità di propagazione, richiedono, per la predizione della resistenza, calibrazioni complesse, mentre l'indagine mediante carotaggio non richiede (quasi) correlazione per l'interpretazione dei dati ma per contro provoca un danno elevato, risulta lenta e costosa. Il carotaggio è comunque il metodo di riferimento per la calibrazione (taratura) di tutti i metodi non distruttivi o parzialmente distruttivi.

Nella scelta della metodologia si deve tener conto delle specifiche capacità e caratteristiche:

- l'indice di rimbalzo permette di valutare le caratteristiche anche dopo breve periodo di maturazione, ma il risultato riguarda solo la superficie esterna,
- la velocità di propagazione, generalmente, operando per trasparenza, richiede l'accessibilità di due superfici opposte, fornisce indicazioni sulla qualità del conglomerato all'interno della struttura,
- la misura della resistenza alla penetrazione e della forza di estrazione caratterizzano la superficie esterna (più in profondità dell'indice di rimbalzo), la

prima è più idonea a saggiare elementi di grosse dimensioni, la seconda è più adatta anche ad elementi di ridotte dimensioni.

La numerosità dei punti di prova è un compromesso tra: accuratezza desiderata, tempo d'esecuzione, costo e danno apportato alla struttura.

A titolo esemplificativo, nella tabella seguente sono riportate alcune indicazioni circa i valori tipici di riferimento per la variabilità ed i limiti di confidenza nella stima della resistenza ottenibili con diversi metodi di prova. Nella stessa tabella è riportata una indicazione di massima riguardante il numero minimo di prove da effettuare in una specifica area di prova.

Metodo di prova	Coefficiente di variazione dei valori ottenuti su un elemento strutturale di buona qualità (%)	Limiti di confidenza [±%] al 95% nella stima della resistenza.	Numero di prove o di campioni relativo ad un'area di prova
Carotaggio	10	10	3
Indice di rimbalzo	4	25	12
Velocità di propagazione	2.5	20	1
Resistenza alla penetrazione	4	20	3
Forza d'estrazione	15	15	9

10.3 *Elaborazione dei risultati*

Un'indagine, mirata alla stima della resistenza, comporta genericamente l'esame di risultati provenienti da prove di resistenza meccanica su carote e/o di dati ottenuti da metodi non distruttivi. Se la numerosità (complessiva) dei risultati relativi ad un'area di prova è pari a tre (3), numero minimo accettabile, si può stimare solamente la resistenza media.

Nel caso sia disponibile una numerosità superiore si può stimare la resistenza caratteristica dell'area di prova, valore che rappresenta il limite inferiore oltre al quale ci si aspetta di trovare il 5 % di tutte le possibili determinazioni.

Per stimare la resistenza caratteristica $f_{cil,ca}$, si può fare riferimento al procedimento riportato qui di seguito (prEN 13791).

Se la numerosità è maggiore o eguale a 15, la resistenza cilindrica caratteristica $f_{c,k}$ è il valore inferiore tra:

$$f_{c,k} = f_{c,m} - 1.48 * s$$

$$f_{c,k} = f_{c,min} + 4$$

dove:

$f_{c,m}$ = valore medio della resistenza cilindrica

$f_{c,min}$ = valore minimo della resistenza cilindrica

s = scarto quadratico medio

Se la numerosità è compresa tra 4 e 14, la resistenza caratteristica $f_{cil,ca}$ è il valore inferiore tra:

$$f_{c,k} = f_{c,m} - k$$
$$f_{c,k} = f_{c,min} + 4$$

dove:

$k = 4$ per n (numerosità dei campioni) compreso tra 10 e 14

$k = 5$ per n compreso tra 7 e 9

$k = 6$ per n compreso tra 4 e 6.

Nell'applicare, comunque, metodi statici all'elaborazione dei risultati delle prove, è comunque opportuno verificare l'applicabilità dei metodi stessi alle specifiche tipologie di prova, con particolare riferimento alle prove non distruttive di diversa natura.

11 Valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera mediante carotaggio

11.1 *Prelievo di campioni mediante carotaggio*

Le procedure per l'estrazione, la lavorazione dei campioni estratti per ottenere i provini e le relative modalità di prova a compressione sono descritte nelle UNI EN 12504-1 (*"Prelievo sul calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione"*), UNI EN 12390-1 (*"Prova sul calcestruzzo indurito – Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme"*), UNI EN 12390-2 (*"Prova sul calcestruzzo indurito – Confezionamento e stagionatura dei provini per prove di resistenza"*) e UNI EN 12390-3 (*"Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei Provini"*).

Si devono prendere in considerazione le seguenti avvertenze:

- Il diametro delle carote deve essere almeno superiore a tre volte il diametro massimo degli aggregati (i diametri consigliati sono compresi tra 75 e 150 mm)
- Le carote destinate alla valutazione della resistenza non dovrebbero contenere ferri d'armatura, (si devono scartare i provini contenenti barre d'armatura inclinate o parallele all'asse)
- Per ottenere la stima attendibile della resistenza di un'area di prova devono essere prelevate e provate almeno tre carote,
- Il rapporto lunghezza diametro dei provini deve essere possibilmente uguale a due (2), si deve evitare che i provini abbiano snellezza (rapporto lunghezza/diametro) inferiore a 1 o superiore a 2,
- I campioni estratti (e i provini) devono essere protetti nelle fasi di lavorazione e di deposito rispetto all'essiccazione all'aria. A meno di diversa prescrizione, le prove di compressione devono essere eseguite su provini umidi.
- Nel programmare l'estrazione dei campioni si deve tener conto che la resistenza del calcestruzzo dipende dalla posizione o giacitura del getto.
- È necessario verificare accuratamente, prima di sottoporre i campioni alla prova di compressione, la planarità ed ortogonalità delle superfici d'appoggio; infatti, la lavorazione o preparazione inadeguata dei provini porta a risultati erranei. Il

semplice taglio e la molatura delle superfici di prova può non soddisfare i requisiti di parallelismo e planarità richiesti dalle norme.

Il carotaggio può risultare improprio per verificare le caratteristiche di calcestruzzi di bassa resistenza ($R_c \leq 20 \text{ N/mm}^2$), o alle brevi scadenze, poiché sia il carotaggio sia la lavorazione delle superfici possono sgretolare e compromettere l'integrità del conglomerato di resistenza ridotta.

La dispersione (variabilità) dei valori di resistenza tende ad aumentare al ridursi della dimensione dei cilindri in prova ed all'aumentare del diametro massimo dell'aggregato; per compensare tale effetto è opportuno, quando possibile, aumentare ragionevolmente il numero dei prelievi.

11.2 Osservazioni circa la stima della resistenza meccanica in situ ottenuta su provini estratti per carotaggio

La resistenza dei provini estratti per carotaggio generalmente è inferiore a quella dei provini preparati nel corso della messa in opera del calcestruzzo e stagionati in condizioni standard, fra i fattori che determinano tale differenza si possono citare: la procedura di messa in opera e di compattazione, la stagionatura, l'effetto del prelievo. In mancanza di un'esperienza diretta è accettabile assumere che, a parità di tempo di stagionatura, la resistenza in situ ottenuta attraverso il carotaggio sia non inferiore a 0,85 volte la resistenza cilindrica del calcestruzzo messo in opera.

La resistenza ricavata dalle prove a compressione sui campioni ottenuti per carotaggio, in particolare la resistenza caratteristica, deve essere considerata con molta prudenza, a ragione della notevole influenza che la messa in opera e le condizioni di stagionatura del calcestruzzo hanno sulle caratteristiche delle carote. Il giudizio delle caratteristiche del calcestruzzo in opera, in base alla resistenza determinata su carote prelevate, deve tener conto dei fattori di conversione necessari a compensare l'effetto della snellezza e della conversione resistenza cilindrica – resistenza cubica.

In prima approssimazione si può assumere che la resistenza di un campione avente diametro compreso tra 100 e 150 mm, ottenuto per carotaggio, avente altezza eguale al diametro, sia la medesima di un equivalente provino cubico da 150 mm, e che la resistenza di un campione ottenuto per carotaggio ed avente rapporto altezza – diametro eguale a 2 sia eguale a quella di un equivalente provino cilindrico. Tenuto conto che, per un campione cilindrico avente rapporto altezza-diametro pari a 2, vale la relazione: $R_{\text{cubica}} = 1,25 R_{\text{cilindrica}}$, per valori intermedi si può fare riferimento ad un fattore di correzione della resistenza cilindrica in funzione del rapporto lunghezza – diametro, riportato nel grafico di figura 11.1.

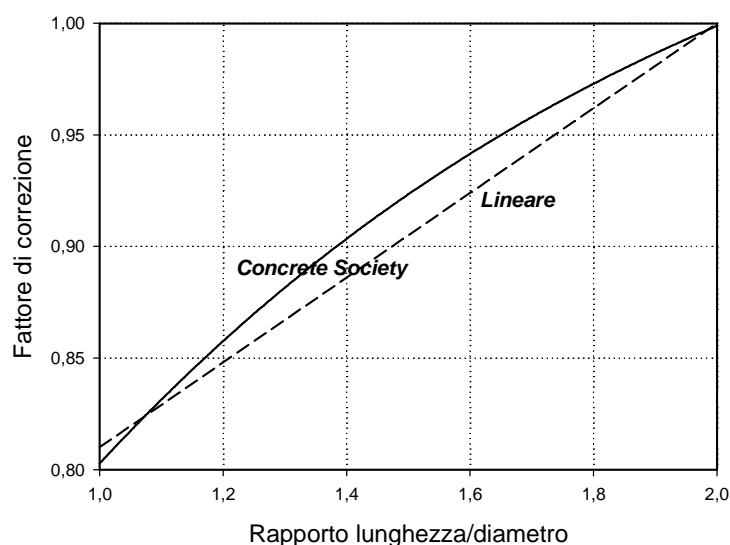


Figura 11-1 Fattori di correzione della resistenza cilindrica in funzione del rapporto di snellezza dei provini (rapporto lunghezza – diametro)

11.3 Microcarotaggio e sua applicabilità

Il microcarotaggio permette di stimare la resistenza meccanica sottoponendo a prova un numero elevato di provini ($n \geq 12$ per ogni area di prova) di ridotte dimensioni ($\Phi \approx h \approx 28$ mm). Il valore medio che si ottiene, pur con un'elevata dispersione, dei valori singoli, è una stima abbastanza affidabile della resistenza a compressione del calcestruzzo dell'area di prova. Questa tecnica è utile nei casi in cui non sia possibile prelevare carote aventi dimensioni normali ($\Phi \geq 50$ mm), quali ad esempio: elementi di piccolo spessore, sezioni molto armate, superfici in cui un prelievo usuale provocherebbe un danno estetico irreparabile. Dato che l'estrazione e la lavorazione delle superfici di calcestruzzi aventi resistenza ≤ 20 MPa, è molto critica, il metodo non risulta idoneo ad indagare tali calcestruzzi.

Le operazioni d'estrazione, di lavorazione dei campioni, di esecuzione delle prove a compressione richiedono controlli accurati che devono essere effettuati da personale esperto e qualificato.

Il procedimento di prova è descritto nella norma UNI10766 ("Calcestruzzo indurito - Prove di compressione su provini ricavati da microcarote per la stima delle resistenze cubiche locali del calcestruzzo in situ").

12 Metodi indiretti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera

12.1 Generalità

I metodi indiretti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera sono basati sulla misura di proprietà diverse dalla resistenza meccanica. E' consuetudine suddividere i metodi: in non distruttivi, che non danneggiano sensibilmente la struttura in esame, e parzialmente distruttivi, che infliggono un danno accettabile e generalmente solo per di più superficiale, e l'integrità delle superfici può essere facilmente ripristinata.

Qui di seguito sono presi in considerazione i metodi più consolidati nella pratica: l'indice di rimbalzo, gli ultrasuoni, l'estrazione di tasselli metallici inseriti nel calcestruzzo e l'infissione di sonde metalliche.

La stima della resistenza meccanica in opera, mediante i metodi non distruttivi, comporta l'utilizzo di correlazioni tra il parametro non distruttivo proprio del metodo impiegato e la resistenza a compressione del calcestruzzo in esame.

La legge di correlazione può essere determinata utilizzando un adeguato numero di campioni, ottenuti mediante carotaggio, sottoposti ad indagine non distruttiva prima della loro rottura, oppure facendo uso di correlazioni standard già disponibili in letteratura per il metodo utilizzato. In questo secondo caso i valori di resistenza stimati possono essere resi più affidabili moltiplicandoli per un opportuno coefficiente correttivo desunto dal confronto con un numero ridotto di prove a compressione su provini ottenuti per carotaggio.

I metodi indiretti non eliminano la necessità del prelievo di carote, ma la numerosità di queste ultime può essere opportunamente ridotta quando si devono valutare grandi volumi di getto. Una preliminare campagna di analisi con metodi indiretti consente di programmare le posizioni di prelievo delle carote, anche sulla base del grado di omogeneità del volume di calcestruzzo in esame, ed eventualmente di suddividere l'area in esame in lotti entro i quali sia possibile definire statisticamente l'omogeneità del calcestruzzo.

12.2 Taratura delle curve di correlazione tra risultati di prove non distruttive e resistenza meccanica

La stima della resistenza meccanica in opera, per mezzo di metodi non distruttivi, si basa sull'impiego di correlazioni tra il parametro non distruttivo proprio del metodo impiegato e la resistenza a compressione del calcestruzzo in esame.

L'andamento della legge di correlazione può essere assunto predefinito per ciascun metodo di indagine, a meno di costanti che possono essere determinate utilizzando un campione di carote di adeguata numerosità, sottoposte ad indagine non distruttiva prima della loro rottura.

È opportuno che le carote utilizzate per la calibrazione siano non meno di tre. I valori numerici delle costanti che precisano l'andamento delle leggi di correlazione possono essere ottenuti applicando tecniche di minimizzazione degli errori.

12.3 *Limiti e precauzioni nell'applicazione dei metodi indiretti di valutazione della resistenza meccanica*

L'utilizzo dei metodi indiretti implica comunque l'esecuzione di prove su carote per la taratura delle curve di calibrazione. I metodi indiretti non possono essere ritenuti sostitutivi delle prove a compressione eseguite su carote. Particolare cautela deve essere prestata nella valutazione della resistenza meccanica mediante l'applicazione delle curve che correlano i risultati delle prove con la resistenza.

I grafici di correlazione forniti a corredo delle apparecchiature di prova non risultano, nella generalità dei casi, del tutto adeguate, poiché il loro sviluppo è basato sull'uso di determinati tipi di calcestruzzo e su prefissate condizioni di prova.

E' perciò essenziale che gli utenti predispongano proprie tavole di calibrazione per il tipo specifico di calcestruzzo da sottoporre a prova, utilizzando i risultati di prove su carote portate a rottura dopo l'esecuzione sulle stesse di prove indirette.

L'uso di metodi esclusivamente non-distruittivi, quali quello dell'indice di rimbalzo e le prove con ultrasuoni, conduce a stime di resistenza affette da errori, nel migliore dei casi, stimabili nell'ordine del $\pm 15 \%$.

Viceversa le prove di estrazione e d'infissione consentono una stima della resistenza con un migliore grado di approssimazione, essendo l'errore usualmente inferiore a $\pm 10 \%$.

Le prove combinate consentono di migliorare la precisione del risultato.

12.4 *Stima delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante l'indice di rimbalzo (o sclerometrico)*

12.4.1 Principio di funzionamento

Il metodo dell'indice di rimbalzo utilizza lo sclerometro per misurare l'energia elastica assorbita dal calcestruzzo a seguito di un impatto. L'energia assorbita dal calcestruzzo è correlata alla rigidità e alla resistenza meccanica mediante relazioni empiriche. Il metodo consiste nel provocare l'impatto di una massa standardizzata contro la superficie del materiale sottoposto a prova e nel misurare l'altezza del rimbalzo, la misura è espressa in termini di percentuale dell'altezza di rimbalzo rispetto alla distanza percorsa della massa in movimento tra l'istante in cui è rilasciata e quando colpisce la superficie del calcestruzzo. Questa percentuale è detta indice di rimbalzo N.

Dato che l'energia cinetica della massa battente è standardizzata, l'altezza di rimbalzo dipende dall'energia dissipata durante l'impatto, che a sua volta dipende dalla resistenza meccanica della superficie del calcestruzzo.

L'indice di rimbalzo è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo, ma è influenzato da numerosi altri fattori, tra cui:

- le condizioni di umidità del calcestruzzo in superficie – (una superficie umida conduce ad un indice di rimbalzo più basso);
- la presenza di uno strato superficiale carbonatato (aumenta l'indice di rimbalzo);
- la tessitura superficiale (una superficie ruvida fornisce generalmente un indice di rimbalzo più basso);

- l'orientazione dello strumento rispetto alla verticale (sono disponibili fattori di correzione approssimati);
- l'età del calcestruzzo;
- la dimensione e il tipo degli aggregati.

Poiché solo il calcestruzzo vicino al punto dell'impatto influenza sensibilmente il valore dell'indice di rimbalzo, la metodologia di prova è sensibile alle condizioni locali, quali la presenza di grossi granuli e gli elementi grossi d'aggregati in prossimità della superficie oppure di vuoti. Per mitigare gli effetti di alcune delle cause che alterano le misure, è pertanto opportuno che nell'intorno d'ogni punto di prova siano eseguite più battute, adeguatamente distanziate fra di loro.

12.4.2 Taratura dello strumento

La taratura dello sclerometro dovrà essere effettuata prima e dopo ogni giornata di lavoro o sequenze di prove, utilizzando l'apposita incudine di riferimento fornita a corredo dal fabbricante (caratterizzato da durezza minima 52 HRC, massa 16 ± 1 kg e diametro di circa 150 mm) cui corrisponde il valore standard dell'indice di rimbalzo N_0 , eseguendo una battuta sull'incudine stessa con lo sclerometro in posizione verticale. Il corrispondente valore di taratura N_t andrà annotato, in maniera da poter correggere in fase di elaborazione i valori rilevati nella sequenza di prove o nella giornata di lavoro.

Qualora N_t si discosti più di 2 o 3 unità da N_0 , lo strumento non può essere utilizzato e deve essere sottoposto a revisione (pulizia e taratura).

12.4.3 Modalità di esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolgerà secondo le seguenti modalità:

- a) individuazione di una zona di misura che presenti le seguenti caratteristiche:
 - assenza di ferri armature in prossimità della superficie (da controllare mediante pacometro);
 - superficie priva di evidenti vespai, forti porosità o rilevanti irregolarità superficiali ecc.;
 - superficie non ricoperta da intonaco, o da vernice, ecc.;
 - superficie possibilmente asciutta.
- b) pulizia e lisciatura della superficie con pietra abrasiva, oppure utilizzando, se necessario, uno smerigliatore per asportare lo strato superficiale di calcestruzzo degradato o irregolare;
- c) esecuzione di non meno di 10 battute sclerometriche all'interno della zona di misura, secondo una griglia preliminarmente definita, mantenendo lo sclerometro perpendicolare alla superficie di misura. Nel caso in cui tale la superficie non sia verticale l'angolo α di inclinazione dello strumento rispetto all'orizzontale deve essere annotato per le successive elaborazioni. I punti su cui si effettuano le battute devono risultare non coincidenti con gli aggregati affioranti e sufficientemente lontani dalle barre di armatura, dagli altri punti di battuta e dagli spigoli dell'elemento.
- d) calcolare la media dei valori degli indici di rimbalzo, verificare l'accettabilità del risultato in base al seguente criterio: almeno l'80% dei valori non deve differire dalla media per

meno di 6 unità. Se tale condizione non si verifica l'intera serie di dati deve essere scartata e le prove vanno ripetute in una nuova zona adiacente.

12.4.4 Elaborazione delle misure

L'elaborazione delle misure sclerometriche consiste nelle seguenti fasi.

- correzione degli indici di rimbalzo per tener conto della taratura dello strumento: gli indici di rimbalzo verranno moltiplicati per il coefficiente N_0/N_i ;
- correzione degli indici di rimbalzo rilevati in funzione dell'angolo d'azione dello strumento, utilizzando le correlazioni fornite in proposito dal fabbricante dello strumento;
- calcolo della media e del coefficiente di variazione dei valori utili degli indici di rimbalzo di ciascuna zona. La media sarà espressa con 1 cifra decimale, il coefficiente di variazione con 2 cifre decimali. Il risultato relativo ad una zona corrisponde al valore medio delle misure arrotondate all'intero più prossimo.

La correlazione tra indice di rimbalzo N e resistenza a compressione R_c è del tipo rappresentato in figura 12-1 e definito dalla:

$$R_c = A * N^B$$

in cui i coefficienti A e B sono opportunamente calibrati mediante prove distruttive su carote.

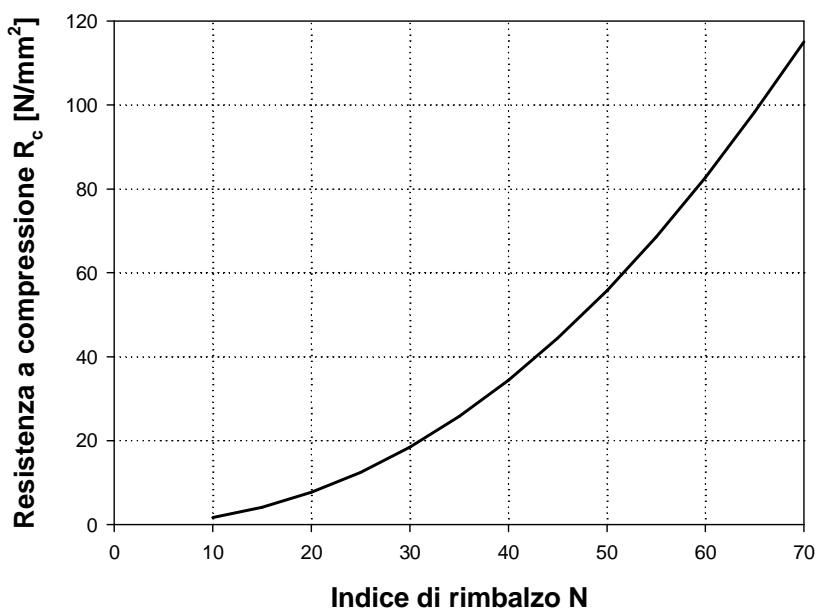


Figura 12-1 Andamento tipico della correlazione tra indice di rimbalzo e resistenza a compressione.

Un utile riferimento per l'esecuzione di prove dell'indice di rimbalzo è costituito dalla norma UNI EN 12504-2 ("Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive-Determinazione dell'indice sclerometrico").

12.5 *Stima delle caratteristiche meccaniche in opera mediante la velocità di propagazione di micro-impulsi (ultrasonici)*

12.5.1 Principio di funzionamento

Il metodo basato sulla misura della velocità di propagazione di ultrasuoni consiste nello studio della propagazione di onde elastiche longitudinali all'interno del calcestruzzo. Caratteristica del metodo è quella che esso tiene conto delle proprietà meccaniche globali del materiale.

La velocità di propagazione delle onde in un materiale omogeneo dipende dalla densità del materiale, dal modulo elastico e dal coefficiente di Poisson. In prima approssimazione la velocità di propagazione è proporzionale alla radice quadrata del modulo elastico ed inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità. Entro i limiti in cui queste leggi possono essere estese ad un materiale eterogeneo come il calcestruzzo, è possibile utilizzarle per valutare il modulo elastico le costanti elastiche del calcestruzzo in esame.

La resistenza a compressione è stimata in base alla velocità di trasmissione degli ultrasuoni, ipotizzando la validità di una relazione di proporzionalità tra resistenza a compressione e modulo elastico, utilizzando correlazioni sperimentali.

Si deve tener presente che le onde elastiche subiscono all'interno dell'elemento esaminato, rifrazioni e riflessioni, dovute alla presenza degli aggregati, di fessure, di vuoti. Ciò comporta un'attenuazione del segnale per effetto dell'assorbimento d'energia. Inoltre, per effetto di vuoti o fessure, il percorso effettivamente compiuto dalle onde elastiche può risultare più lungo della distanza tra trasmettitore e ricevitore.

La prova misura la velocità di propagazione delle onde elastiche nel calcestruzzo, determinata come rapporto tra la distanza fra trasmettitore e ricevitore ed il tempo impiegato a percorrerla. La velocità così calcolata può differire dall'effettiva velocità di propagazione delle onde nel calcestruzzo in esame. Per questo motivo la velocità così calcolata è spesso denominata anche "velocità apparente".

La velocità di propagazione delle onde elastiche è influenzata da diversi fattori, tra cui il contenuto d'umidità, la composizione della miscela ed il grado di maturazione. La determinazione della velocità deve tener conto della possibile presenza d'armature metalliche e di eventuali difetti macroscopici.

Per ridurre il rischio che il fascio di ultrasuoni percorra armature metalliche è opportuno, preliminarmente all'esecuzione della prova, localizzare le armature stesse mediante dispositivi magnetici.

12.5.2 Taratura dello strumento

La taratura dello strumento consiste nella misura del tempo T_t (in μs) impiegato dalle onde elastiche a percorrere, secondo la sua altezza, il cilindro o il prisma metallico di taratura fornito a corredo dello strumento. Il tempo di percorrenza T_0 , predeterminato dal fabbricante, costituisce il riferimento di taratura.

Se il valore di T_t differisce per più di 2 o 3 unità (μs) dal valore di T_0 lo strumento deve essere ricalibrato seguendo le istruzioni del fabbricante.

La taratura dello strumento deve essere ripetuta varie volte nel corso della giornata di misure: all'inizio e al termine della giornata, ogni qualvolta cambino le condizioni

ambientali (per temperatura, insolazione, umidità, ecc.) e/o la configurazione dello strumento (cambio di cavi di connessione e/o di trasduttori, ecc.).

12.5.3 Modalità d'esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolgerà secondo le seguenti modalità:

- a) individuazione di una zona di misura idonea
- b) pulizia della superficie ed eventuale lisciatura
- c) posizionamento dei punti di misura.
- d) Rilievo della distanza tra i punti estremi di ciascun percorso di misura, utilizzando un idoneo strumento. Nel caso della trasmissione diretta la distanza deve essere riportata con la precisione di $\pm 1\%$. Per le misure indirette si fa riferimento alla posizione del centro della faccia dei trasduttori.

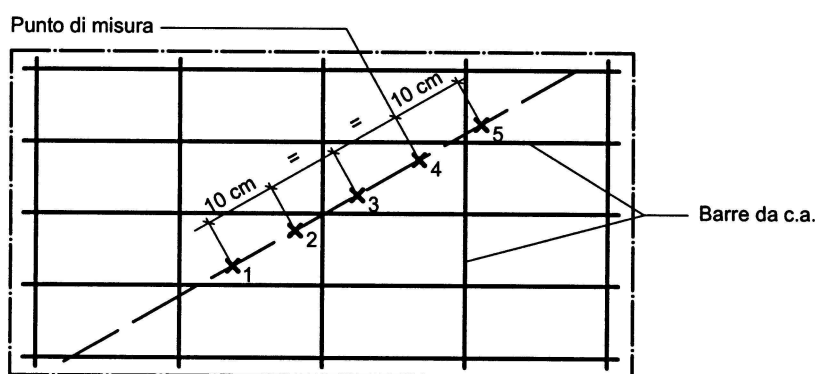


Figura 12-2 - Schema di posizionamento dei punti nel caso di misure indirette.

- e) Esecuzione delle misure nella zona individuata con le seguenti le modalità:
 - possono essere utilizzate in alternativa sonde puntiformi o sonde a superficie piana; in entrambi i casi la bontà delle misure è legata alla realizzazione del corretto accoppiamento tra sonda e calcestruzzo. Nel caso delle sonde puntiformi ciò si ottiene esercitando una pressione adeguatamente elevata contro il calcestruzzo. Nel caso, invece delle sonde piane è necessario interporre tra sonda e calcestruzzo un appropriato materiale d'accoppiamento (es. grasso di vaselina). Particolare cura verrà posta in ogni caso nel controllare che, nelle aree di contatto, non ci siano granuli sciolti di aggregato fine interposti tra sonda e calcestruzzo.
 - in ogni zona di misura si effettuano almeno 10 misure su percorsi diversi; nel caso delle misure indirette, (figura 12-2) le 10 misure sono quelle sui seguenti percorsi: (figura 12-3): 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 2-3, 2-4, 2-5, 3-4, 3-5, 4-5;
 - nel caso di misure effettuate con trasduttori piani, dato che è necessario interporre tra i trasduttori e la superficie del calcestruzzo uno strato di grasso di accoppiamento, i trasduttori vanno premuti in modo tale da far rifluire il grasso in eccesso;
 - Il tempo di transito T si legge sul visualizzatore (temporizzatore od oscilloscopio) con la risoluzione di $1\ \mu\text{s}$.

f) Al termine delle misure su ogni zona è necessario eseguire un controllo delle misure eseguite, verificando i valori medi della velocità di propagazione delle onde elastiche.

Il controllo dovrà essere effettuato come segue:

- si dovrà verificare l'omogeneità dei valori di velocità (la differenza tra il valore massimo e minimo dovrebbe essere contenuta entro i $200 \div 300$ m/s);
- si dovrà verificare il valore medio della velocità: misure su calcestruzzo che portano a velocità di trasmissione superiore a 4800 m/s o inferiori a 2500 m/s devono essere ulteriormente verificate, tenendo presenti i seguenti valori orientativi della velocità apparente V degli ultrasuoni:
 - per calcestruzzi di cattiva qualità $V < 3000$ m/s,
 - per calcestruzzi di media qualità $3000 \text{ m/s} \leq V \leq 4000$ m/s,
 - per calcestruzzi di buona qualità $V > 4000$ m/s).

12.5.4 Elaborazione delle misure

L'elaborazione delle misure di velocità di propagazione di micro-impulsi consiste nelle seguenti fasi.

a) calcolo delle velocità di propagazione V con la seguente relazione:

b)

$$V = \frac{\ell}{T - (T_t - T_0)}$$

dove:

ℓ è la lunghezza della base di misura,

T è il tempo di propagazione tra trasmettitore e ricevitore,

T_t è il tempo impiegato dalle onde elastiche a percorrere, secondo la sua altezza, il cilindro o il prisma metallico di taratura fornito a corredo dello strumento,

T_0 è il tempo di percorrenza, predeterminato dal fabbricante, relativo al cilindro o del prisma di taratura.

b) la velocità di propagazione V si esprime in m/s arrotondando il valore ai più prossimi 10 m/s.

La correlazione tra velocità di propagazione, V , delle onde elastiche e resistenza a compressione, R_c , è del tipo rappresentato in figura 12-3 e definito dalla:

$$R_c = A e^{B V}$$

in cui i coefficienti A , B sono opportunamente calibrati mediante prove distruttive su carote.

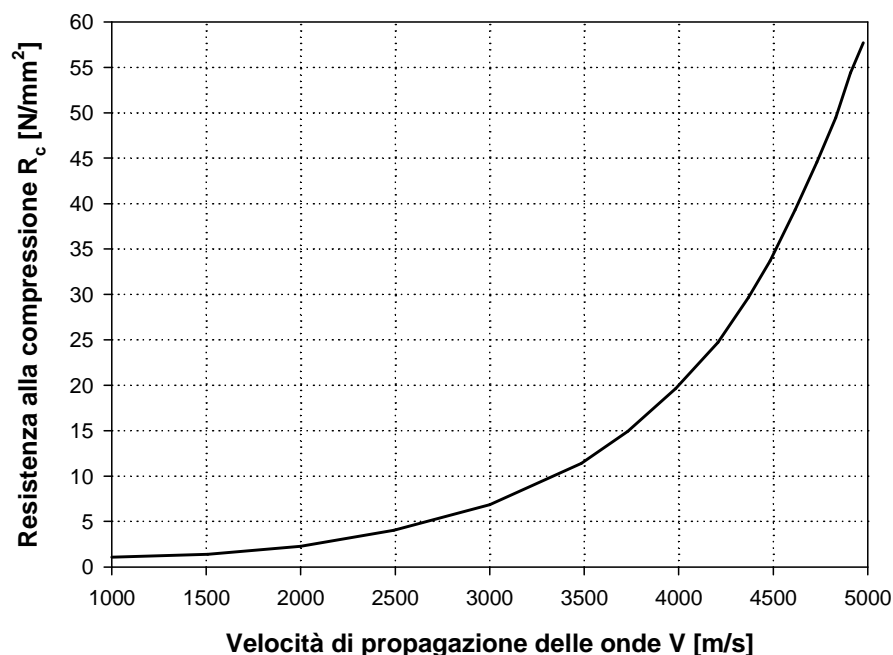


Figura 12-3: Andamento tipico della correlazione tra velocità di propagazione delle onde elastiche [V] e resistenza a compressione [R_c].

Un utile riferimento per l'esecuzione di prove di velocità di propagazione d'onde microsismiche è costituito dalla norma UNI EN 12504-4 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici").

12.6 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla forza di estrazione (pull-out)

12.6.1 Principio di funzionamento

Il metodo è basato sulla misura della forza necessaria ad estrarre dal calcestruzzo un inserto metallico standardizzato. Gli inserti metallici possono essere installati nel calcestruzzo fresco, predisponendoli nelle casseforme, o inseriti in fori effettuati nel calcestruzzo indurito. La forza è applicata mediante un martinetto idraulico collegato all'inserto ed un anello di reazione che contrasta con la superficie del calcestruzzo. Durante l'operazione viene estratto un cono di materiale e, pertanto, la prova è parzialmente distruttiva.

La forza di estrazione è rappresentativa di uno stato di sollecitazione complesso, ma il suo valore è correlabile con la resistenza a compressione. La correlazione tra forza d'estrazione e resistenza a compressione varia al variare della resistenza del calcestruzzo, ma è migliore delle correlazioni esistenti tra resistenza a compressione e indice di rimbalzo o velocità di propagazione delle onde elastiche.

12.6.2 Taratura della strumentazione

La strumentazione per le prove di estrazione non richiede taratura *in situ*. L'apparecchio di estrazione deve essere corredato di un sistema indicatore della forza massima applicata, e calibrato in modo che l'errore del valore letto sia inferiore a $\pm 2\%$.

12.6.3 Modalità di esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolge nel caso di impiego di inserti post-inseriti nel calcestruzzo, secondo le seguenti modalità:

- a) individuazione di una zona di misura idonea,
- b) I punti di misura devono risultare non coincidenti con aggregati affioranti e sufficientemente distanti dalle barre di armatura, dagli altri punti di misura e dagli spigoli dell'elemento;
- c) In ogni area di misura si devono effettuare almeno 3 estrazioni. Ogni estrazione deve essere eseguita con la seguente procedura:
 - esecuzione del foro ortogonalmente alla superficie del calcestruzzo;
 - evacuazione della polvere dal foro, inserimento del tassello per tutta la sua lunghezza e sua forzatura per espansione contro le pareti del foro;
 - posizionamento del martinetto sul calcestruzzo ed inserimento del tirante nel foro del martinetto avvitandolo con forza nel tassello;
 - centratura del martinetto rispetto al tassello ed esecuzione della prova di estrazione;
 - l'incremento della pressione (o del carico) nel martinetto deve essere graduale e costante (0.5 ± 0.2 kN/s ;
 - rilievo della forza F di estrazione, in kN e registrazione del risultato.
- d) Effettuate le 3 estrazioni, verrà calcolata la media tra i 3 valori di F . Qualora uno di essi si discosti di più del 20% dal valore medio, tale valore dovrà essere sostituito dal risultato di un'ulteriore estrazione eseguita in prossimità delle altre; se anche in questo caso il criterio di accettazione non risulta verificato si dovranno ripetere le 3 estrazioni in una nuova zona adiacente.

12.6.4 Elaborazione delle misure

La correlazione tra la forza d'estrazione F , ricavata dalla pressione misurata al martinetto, e la resistenza cubica R_c è del tipo rappresentato in figura 12-4 e definito dalla:

$$R_c = A + B F.$$

in cui i coefficienti A e B sono opportunamente calibrati mediante prove distruttive a compressione su carote.

La figura 12.4 fornisce un esempio della calibrazione che ne dovrà derivare:

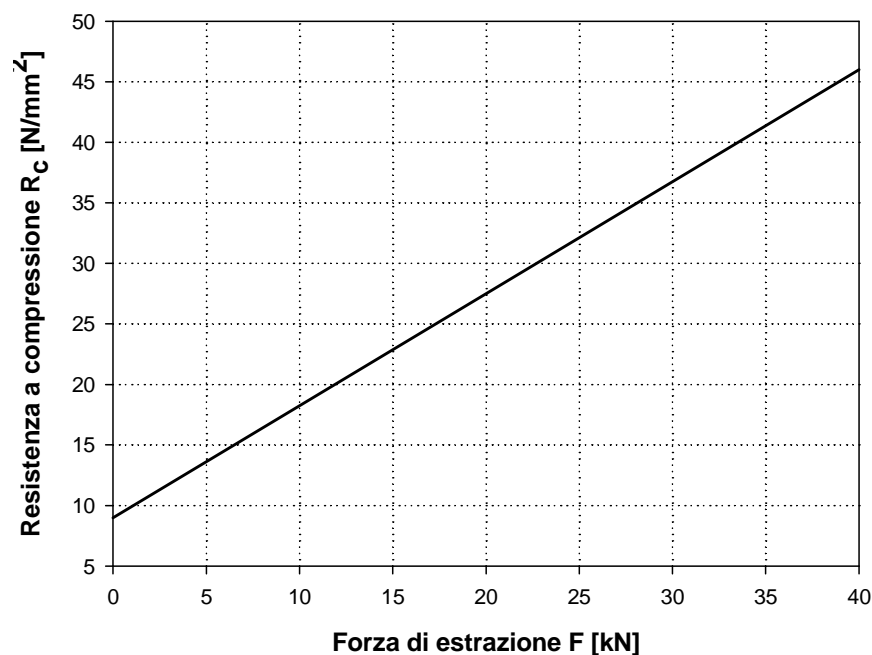


Figura 12-4: Andamento esemplificativo della correlazione tra forza di estrazione F e resistenza a compressione R_c .

Un utile riferimento per l'esecuzione di prove di estrazione è costituito dalla norma UNI EN 12504-3 (*"Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione"*).

12.7 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla profondità di penetrazione di sonde

12.7.1 Principio di funzionamento

Nella tecnica basata sulla resistenza alla penetrazione, si misura la profondità di penetrazione nel calcestruzzo di un'asta d'acciaio infissa con energia prestabilita. Il dispositivo impiegato è una speciale pistola (sonda Windsor) che utilizza una carica esplosiva normalizzata. La profondità di penetrazione della sonda è un indicatore della resistenza del calcestruzzo. Nel momento in cui la sonda si infigge nel calcestruzzo, una parte della sua energia cinetica si dissipa per attrito tra la sonda ed il calcestruzzo, mentre parte frattura e schiaccia il calcestruzzo. Generalmente la regione in cui il calcestruzzo è danneggiato ha approssimativamente la conformazione di un cono.

Questo metodo fornisce buone prestazioni per la valutazione dell'evoluzione della resistenza del calcestruzzo nello stadio iniziale di maturazione allo scopo di determinare il tempo più appropriato di sformatura e per determinare la resistenza relativa in parti differenti della stessa struttura.

Il risultato della prova è influenzato dalla durezza e dalla resistenza degli aggregati impiegati per confezionare il calcestruzzo, mentre è poco dipendente dalle condizioni della superficie dell'elemento, quali scabrezza e carbonatazione.

12.7.2 Taratura della strumentazione

La strumentazione per le prove di penetrazione non richiede taratura. La costanza dell'energia di infissione è infatti assicurata dalla potenza delle cariche esplosive fornite dal produttore dello strumento.

12.7.3 Modalità d'esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità:

- a) individuazione di una idonea zona di misura idonea
- b) I punti di misura devono risultare non coincidenti con gli aggregati affioranti e sufficientemente lontani dalle barre di armatura, dagli altri punti di misura e dagli spigoli dell'elemento.
- c) Ogni prova deve essere costituita da non meno di 3 infissioni; tali infissioni possono essere eseguite utilizzando la apposita dima triangolare, contenente un foro per ogni vertice, fornita usualmente a corredo della strumentazione, che garantisce la corretta spaziatura fra i punti di misura. Ogni misura deve essere eseguita con la seguente procedura:
 - infissione della sonda perpendicolarmente alla superficie del calcestruzzo;
 - rimozione del calcestruzzo distaccato in maniera tale da ottenere una superficie piana attorno alla sonda;
 - esecuzione della misura della lunghezza W della sonda fuoriuscente dal calcestruzzo con una risoluzione di 0.5 mm; nel caso in cui la sonda sia inclinata rispetto alla perpendicolare alla superficie del calcestruzzo, il valore di W può essere ottenuto quale media dei corrispondenti valori misurati in 4 punti situati a 90° l'uno dall'altro lungo la testa della sonda;
 - nel caso di rifiuto della sonda, si può attribuire a W il valore massimo di 60.0 mm.
- d) Effettuate le 3 infissioni, si verrà calcolata la differenza tra il valore massimo e minimo di W . Se tale differenza è minore di 8 mm la prova è da considerarsi accettabile; se invece risulta maggiore, va scartato il valore che si discosta maggiormente dalla media dei 3 valori ed esso va sostituito con quello ricavato da una quarta infissione. Verrà quindi calcolata la nuova differenza tra il valore massimo ed il valore minimo di W ; se questa nuova differenza è minore di 8 mm la prova è da considerarsi accettabile; in caso contrario bisogna ripetere le infissioni in una nuova zona adiacente.
- e) Rilevare la durezza Mohs degli aggregati.

12.7.4 Elaborazione delle misure

L'elaborazione delle misure eseguite nel corso di prove d'infissione consiste nel calcolo della media dei valori di W di ciascuna zona. La media si deve essere esprime essa con una cifra decimale. La correlazione tra la lunghezza W e la resistenza cubica R_c è del tipo rappresentato in figura 12-5 e definito dalla:

$$R_c = A + B W F.$$

in cui i coefficienti A e B sono ottenuti per calibrazione mediante prove distruttive a compressione su carote.

La figura 12.5 fornisce un esempio della calibrazione che ne dovrà derivare:

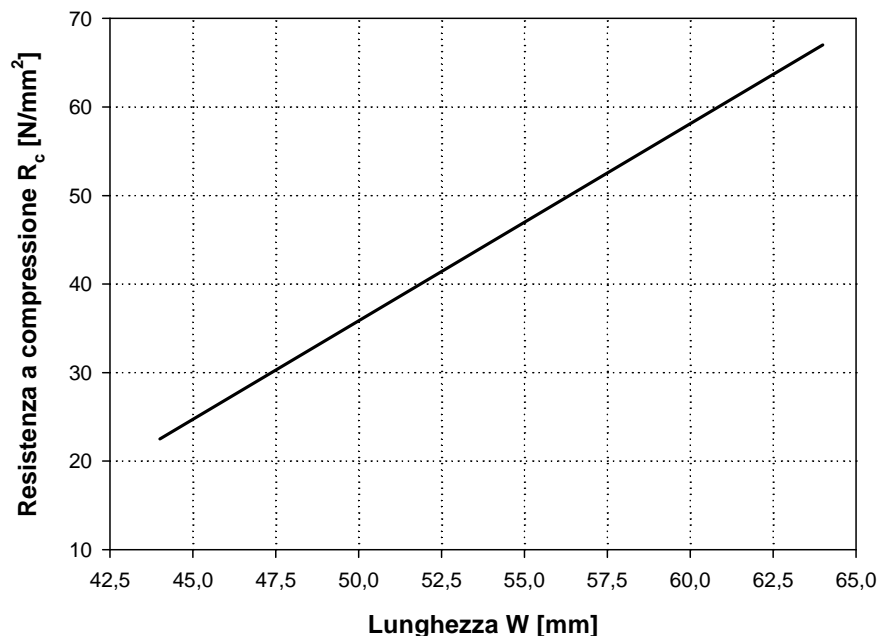


Figura 12-5: Andamento esemplificativo della correlazione tra lunghezza [W] e resistenza a compressione [Rc].

Un utile riferimento per l'esecuzione di prove di infissione è costituito dalla norma ASTM C803.

12.8 Stima delle caratteristiche meccaniche mediante l'impiego di metodi combinati

I metodi combinati consistono nell'applicazione di due o più metodi d'indagine per la valutazione della resistenza del calcestruzzo. La disponibilità di risultati provenienti da metodi diversi consente di stimare la resistenza mediante più correlazioni che migliorano l'affidabilità della resistenza meccanica stimata.

Tra i metodi combinati più noti si ricordano:

- 1) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni (metodo SONREB);
- 2) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni + misura della forza di estrazione;
- 3) misura dell'indice di rimbalzo + misura della velocità di propagazione degli ultrasuoni + misura della profondità d'infissione.

L'esecuzione di prove combinate ed, in particolare di quelle che prevedono l'esecuzione di prove parzialmente distruttive (estrazione di inserti o prove di penetrazione), consente di migliorare la precisione del risultato mediante l'applicazione di tecniche statistiche di correlazione multivariabili.

12.9 ***Determinazione d'altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro***

12.9.1 Principio di funzionamento

La misurazione dello spessore del copriferro delle armature e l'individuazione delle barre di armatura può essere effettuata utilizzando dispositivi denominati "misuratori di ricoprimento" o "pacometri".

Questi strumenti sono dispositivi magnetici che si basano sul principio per cui la presenza dell'acciaio immerso nel calcestruzzo influenza il campo magnetico generato da un elettromagnete.

La sonda di un'attrezzatura tipica è costituita da un nucleo magnetico molto permeabile, a forma di U, sul quale sono montate due bobine, nella prima bobina è fatta passare una corrente alternata nota, la seconda serve per misurare la corrente indotta.

La corrente indotta dipende dal valore della riluttanza del circuito magnetico, che, a sua volta, dipende dalla vicinanza delle barre d'armatura: se il circuito magnetico comprende oltre al nucleo magnetico ed al calcestruzzo, anche una barra di armatura, la riluttanza diminuisce ed aumenta la corrente indotta nella bobina cantatrice, che viene misurata mediante un amperometro a bobina mobile.

La riluttanza è influenzata sia dal diametro dell'armatura sia dalla profondità a cui essa si trova al di sotto della superficie e pertanto è possibile correlare il valore della corrente misurata con lo spessore del copriferro ed il diametro dell'armatura.

I risultati possono essere presentati sia sotto forma di valori puntuali, sia che sotto forma di immagini bidimensionali, eseguendo una scansione nell'intorno del punto di prova.

Gli strumenti commerciali generalmente forniscono risultati attendibili per elementi debolmente armati e barre d'armatura prossime alla superficie.

12.9.2 Taratura della strumentazione

La strumentazione per le prove di individuazione delle armature non richiede normalmente taratura in sito.

N.B. La prova non è normalizzata.

12.10 ***Determinazione d'altre proprietà del calcestruzzo in opera: Determinazione della profondità di carbonatazione***

12.10.1 Principio

La prova si basa sulla proprietà di un indicatore chimico ad indicare, con variazione di colore, la basicità di una soluzione acquosa presente su una superficie. Generalmente è utilizzata una soluzione all'1% di fenolftaleina in alcool etilico. La fenolftaleina vira al rosso al contatto con soluzioni il cui pH è maggiore di 9.2 e rimane incolore per valori di pH minori, quali quelle del calcestruzzo carbonatato.

12.10.2 Modalità di esecuzione

La prova può essere eseguita sia su campioni di calcestruzzo prelevati da un elemento sia su superfici di frattura con bordi a vista. È fondamentale che sia disponibile un riscontro della quota interna rispetto alla superficie esterna del calcestruzzo.

La prova può essere eseguita utilizzando in alternativa:

- a) un campione che può essere costituito da carote, microcarote o coni d'estrazione;
- b) una superficie di frattura.

Nel primo caso il campione deve essere pulito prima della prova per eliminare la presenza di frammenti o detriti. Nel secondo caso la superficie da esaminare deve essere ottenuta prodotta subito prima di effettuare la prova, deve presentare bordi netti ed andamento possibilmente normale a quella della superficie esterna, deve essere ripulita dalla presenza di frammenti e detriti.

L'esecuzione delle prove si svolge secondo le seguenti modalità:

- a) Nel caso in cui la superficie in esame è particolarmente arida e secca, può essere necessaria una preventiva umidificazione con acqua pulita (con pennello o spruzzatore) attendendo, per le successive operazioni che la superficie tenda a riessicare. La superficie da esaminare deve essere bagnata con la soluzione di fenolftaleina mediante un pennello od un nebulizzatore curando di non far colare la soluzione.
- b) la misura della quota della linea che demarca la superficie colorata deve essere eseguita dopo un conveniente tempo di attesa (30 – 60 minuti) mediante un regolo e con la precisione del millimetro ad intervalli equispaziati onde poter rilevare il valore minimo, medio e massimo.

Un utile riferimento per l'esecuzione della prova è costituito dalla norma UNI 9944. (*“Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.”*).

12.11 ***Valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in sito***

La permeabilità del calcestruzzo in sito può essere valutata utilizzando indagini sperimentali che possono essere raggruppate in tre categorie:

- prove basate sulla misura dell'assorbimento di acqua;
- prove basate sulla misura delle permeabilità all'acqua;
- prove basate sulla misura della permeabilità all'aria.

Tutti i metodi sopra ricordati presentano inconvenienti e limitazioni che rendono di fatto poco consigliabile il loro impiego. Si deve rimarcare che la permeabilità del calcestruzzo in situ è fortemente influenzata dall'umidità e dalla temperatura, fattori che possono condizionare significativamente i risultati di prova.

12.12 *Ulteriori indagini strumentali sul calcestruzzo in opera*

Ulteriori tecniche di indagine sono disponibili per la valutazione di proprietà meccaniche del calcestruzzo diverse dalla resistenza, quali l'omogeneità dei getti, l'eventuale presenza di vuoti, il contenuto di umidità, ecc.. Tra queste si ricordano:

- la termografia infrarossa, utilizzata per individuare disomogeneità all'interno della massa del calcestruzzo, in particolare nelle pavimentazioni e negli impalcati da ponte;
- il georadar, utilizzato per determinare il contenuto di umidità del calcestruzzo, la presenza di disomogeneità o di eventuali inclusioni di oggetti metallici.

Bibliografia

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – Linee guida sul calcestruzzo strutturale (1996).

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza (2001).

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – Linee guida per la produzione, il controllo ed il trasporto del calcestruzzo preconfezionato (2003)

D.M. LL.PP. 09.01.1996 – Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e delle strutture metalliche.

D.M. Infrastrutture 14.01.08 – Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

UNI-ENV 13670 – 1:2001 Esecuzione delle opere in calcestruzzo – Requisiti comuni

EN 1992 1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1 General rules for buildings.

UNI-EN 206-1:2006 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità.

UNI 11104:2004 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità: istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1

UNI EN 12350 (parti 1 – 7) Prove sul calcestruzzo fresco: Campionamento, Prova di abbassamento al cono, Prova Vébé, Indice di compattabilità, Prova di spandimento alla tavola a scosse, massa volumica, Contenuto d'aria - metodo per pressione.

UNI 11040:2003 Calcestruzzo autocompattante – Specifiche, caratteristiche, e controlli.

UNI EN 13791:2008 – Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo

UNI EN 12504-1:2002 Calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione.

UNI EN 12504-2:2001 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione dell'indice sclerometrico.

UNI EN 12504-3:2005 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione della forza di estrazione.

UNI EN 12504-4:2005 Prove sul calcestruzzo nelle strutture – parte 4 – Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

UNI EN 12390-1:2002 Prova sul calcestruzzo indurito – Forma, dimensioni e altri requisiti per provini e per casseforme.

UNI EN 12390-2:2002 Prova sul calcestruzzo indurito – Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza

UNI EN 12390-3:2003 Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei provini

UNI EN 12390-7:2002 Prova sul calcestruzzo indurito – Massa volumica del calcestruzzo indurito.

UNI 10766:1999 Calcestruzzo indurito – Prove di compressione su provini ricavati da microcarote per la stima delle resistenze cubiche locali del calcestruzzo in situ.

UNI 10834:1999 Calcestruzzo proiettato.

ACI 228.1R (95) In place Methods to estimate Concrete strength.

ACI 228.2R (98) Non destructive Test Methods for Evaluation of concrete in structures.

ACI 304R 00 Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete.

ACI 308R (01) Guide to curing Concrete.

ACI 308.1 (98) Standard Specification for curing Concrete.

ACI 347 (01) Guide to formworks for concrete.