



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Il Presidente

- VISTO il decreto del Presidente della Repubblica 27 aprile 2006, n.204, “*Regolamento di riordino del Consiglio Superiore dei lavori pubblici*”, come modificato dal citato DPR 211/2008, e in particolare l’articolo 2, comma 3), e l’articolo 9;
- VISTO il decreto del Presidente della Repubblica 11 febbraio 2014, n.72, concernente “*Regolamento recante l’organizzazione del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti*”;
- VISTO il decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti del 4 agosto 2014, n.346, recante la rimodulazione del numero e dei compiti degli Uffici della struttura organizzativa del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti ed anche delle Divisioni del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei lavori pubblici;
- VISTA la legge 5 novembre 1971, n.1086, recante “*Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica*”;
- VISTA la legge 2 febbraio 1974, n.64, concernente “*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*”;
- VISTO il decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380, recante il “*Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia di edilizia*”;
- VISTO il decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 recante “*Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*”;
- VISTE le “*Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive*” emanate dal Servizio Tecnico Centrale nel febbraio 2008;
- VISTA la bozza delle “*Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale*” e delle “*Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera*” redatte da un Gruppo di lavoro incaricato della revisione del predetto documento e trasmesse dal Servizio Tecnico Centrale, per esame e parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, con nota n.10145 del 05.12.2016;
- VISTO il parere espresso dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei lavori pubblici con il voto n. 80 espresso nell’Adunanza del 30 marzo 2017 in merito alle suddette Linee Guida;
- VISTO il testo delle “*Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale*” e delle “*Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera*”, trasmesso dal Coordinatore del Servizio Tecnico Centrale con nota n. 6830 del 24.07.2017;

RITENUTO necessario provvedere all'approvazione delle *"Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale"* e delle *"Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera"* al fine di adeguare le linee guida vigenti agli sviluppi tecnici, scientifici e normativi del settore nel frattempo intercorsi;

DECRETA

Articolo 1

E' approvato il testo delle *"Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale"* e delle *"Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera"*.

Articolo 2

Le *"Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale"* e le *"Linee Guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera"* sostituiscono le precedenti *"Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive"* emanate dal Servizio Tecnico Centrale nel febbraio 2008.

Articolo 3

Il presente decreto e le Linee Guida allegate sono pubblicati sul sito internet istituzionale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.


Massimo SESSA



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Servizio Tecnico Centrale

**LINEE GUIDA PER LA MESSA IN OPERA DEL
CALCESTRUZZO STRUTTURALE**

Settembre 2017

Documento positivamente licenziato con Parere n. 80/2016, espresso dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. nella adunanza del 30 marzo 2017

GENERALITÀ.....	4
1. Campo di applicazione.....	4
2. Definizioni.....	4
3. Specifiche progettuali e di capitolato.....	8
4. Gestione della qualità.....	9
5. Verifiche ed operazioni preliminari alla messa in opera del calcestruzzo.....	11
5.1 Casseforme.....	11
5.2 Strutture di supporto.....	17
5.3 Armature per calcestruzzo.....	18
5.3.1 Verifica delle forniture.....	18
5.3.2 Processo di sagomatura delle armature per c.a.....	19
5.3.3 Assemblaggio e messa in opera delle armature.....	23
5.3.4 Giunzioni.....	23
6. Trasporto, messa in opera e compattazione del calcestruzzo.....	23
6.1 Trasporto del calcestruzzo fresco.....	24
6.2 Controlli di qualità del calcestruzzo.....	26
6.3 Messa in opera del calcestruzzo.....	27
6.3.1 Fornitura del calcestruzzo.....	27
6.3.2 Movimentazione del calcestruzzo.....	29
6.3.3 Operazioni di getto.....	30
6.3.4 Riprese di getto.....	33
6.4 Compattazione del calcestruzzo.....	34
6.4.1 Compattazione mediante vibrazione.....	36
6.4.2 Grado di Compattazione.....	37
6.5 Calcestruzzo proiettato.....	38
6.6 Fessurazione del calcestruzzo in fase plastica.....	39
6.7 Assestamento plastico.....	40
6.8 Ritiro plastico.....	42
7. Maturazione e protezione del calcestruzzo.....	43
7.1 Condizioni di clima particolari.....	46
7.2 Sviluppo di calore: getti di massa.....	49
7.3 Protezione termica durante la maturazione.....	52
7.4 Disarmo.....	53
8. Prescrizioni relative all'esecuzione di pavimentazioni in calcestruzzo.....	55
8.1 Pianificazione delle operazioni.....	55

8.2 Condizioni ambientali.....	55
8.3 Documentazione tecnico/contrattuale	55
8.4 Preparazione e tolleranze nella massiciata	55
8.5 Fasi operative dell'esecuzione.....	56
8.5.1 Isolamento strutture verticali e spiccati verticali	56
8.5.2 Barriera vapore/scorrimento.....	57
8.5.3 Posa armatura (reti, fibre, barrotti).....	57
8.5.4 Fornitura del calcestruzzo a piè d'opera	57
8.5.5 Sequenza campiture di posa.....	58
8.5.6 Posa in opera calcestruzzo.....	58
8.5.7 Applicazione strato di usura	58
8.6 Protezione e stagionatura	59
8.7 Giunti	60
8.7.1 Riempimenti e sigillature	60
8.8 Tipo finitura	61
8.9 Influenza delle condizioni ambientali sulla posa del calcestruzzo	62
8.10 Protezione del lavoro eseguito.....	63
8.11 Impiantistica	63
8.12 Impianti di riscaldamento/raffrescamento a pavimento	63
Bibliografia	64

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. Il documento ha l'obiettivo di evitare errori riconducibili a procedure improprie che possano pregiudicare le attese, in termini di resistenza e di durabilità, alla base del progetto.

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 maturazione, atte a realizzare un calcestruzzo strutturale con le caratteristiche di resistenza e di durabilità previste dal progetto.

Il documento proposto tocca, quindi, aspetti fondamentali per la sicurezza delle opere, 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 ausilio a progettisti ed operatori del settore delle costruzioni.

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. In tal senso, infatti, le Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti prevedono l'impiego di calcestruzzo a prestazione garantita, limitando l'utilizzo a composizione richiesta a casi particolari, casi in cui il progettista si assuma la responsabilità delle prestazioni.

1. Campo di applicazione

Le presenti Linee Guida si applicano prevalentemente al calcestruzzo per uso strutturale, 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 fibro-rinforzato, calcestruzzo autocompattante (SCC), calcestruzzo proiettato, ecc..

2. Definizioni

Armatura

Insieme degli elementi d'acciaio da utilizzare unitamente al calcestruzzo per la realizzazione di elementi strutturali portanti in cemento armato.

Assestamento plastico

Perdita di planarità del calcestruzzo in fase plastica contraddistinta da lesioni superficiali in corrispondenza delle armature di pelle e di qualsiasi altro elemento fisso.

Barra

Barra di acciaio ad aderenza migliorata nei diametri da 6 a 40 mm per l'acciaio B450C e da 5 a 10 mm per l'acciaio B450A;

Boiaccia

Miscela fluida di cemento ed acqua.

Calcestruzzo confezionato con processo industrializzato

Calcestruzzo prodotto mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno al cantiere stesso. Tali impianti devono essere idonei ad una produzione costante e disporre di apparecchiature adeguate per il confezionamento, nonché di personale esperto e di attrezzature idonee. Gli impianti devono dotarsi di un sistema permanente di controllo interno della produzione.

Calcestruzzo confezionato con processo non industrializzato

Calcestruzzo confezionato mediante processo di produzione temporanea, direttamente in cantiere, per quantità di calcestruzzo inferiori a 1500 m³ di miscela omogenea.

Carbonatazione

Processo che avviene sulla superficie esterna del calcestruzzo indurito, dovuto alla neutralizzazione dell'idrossido di calcio per effetto dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera.

Casseforme

Casseforme verticali componibili e non, casseforme orizzontali componibili e non, casseforme componibili e non dedicate a specifiche realizzazioni; opere provvisorie costituite da elementi destinati a contenere e/o sostenere il calcestruzzo durante il getto e la maturazione dello stesso fino a quando la struttura sia autoportante al fine di conferire al calcestruzzo stesso la forma e la finitura superficiale richieste, in conformità alle relative tolleranze riportate nelle specifiche del Capitolato tecnico.

Centro di trasformazione

Impianto esterno alla fabbrica e/o al cantiere, fisso o mobile, che riceve dal produttore di acciaio elementi base (barre, rotoli, reti, lamiere o profilati, profilati cavi, ecc.) e confeziona elementi strutturali direttamente impiegabili in cantiere, pronti per la messa in opera o per successive lavorazioni.

Certificato di prova

Documento rilasciato da un laboratorio di cui all'art. 59 del DPR n. 380/2001, sul quale sono riportati gli esiti delle prove effettuate in accordo alla norma.

Coesività

Proprietà del calcestruzzo fresco di resistere alla segregazione.

Compattazione

Azione dinamica applicata al calcestruzzo, nel corso della messa in opera, tramite la vibrazione, che assicura il costipamento del calcestruzzo; la compattazione è finalizzata a minimizzare il contenuto d'aria in eccesso intrappolata nell'impasto del calcestruzzo, per ottenere la migliore omogeneità e densità possibile del conglomerato cementizio.

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 tra la superficie dell'armatura più esterna e la faccia del calcestruzzo più prossima.

Curing

Insieme di azioni o agenti esterni utilizzati per proteggere il calcestruzzo durante la maturazione.

Disarmante

Agente che, applicato al rivestimento 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.

Elemento strutturale

Una parte definita ed individuata della struttura.

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)

Tessitura, aspetto, colore ecc. della superficie del calcestruzzo in relazione alla geometria degli elementi delle strutture.

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.

Giunto di costruzione

Soluzione di continuità attraverso l'elemento tecnico per la separazione di porzioni di uno stesso elemento strutturale.

Grado di compattazione

Confronto tra la misura della massa volumica (peso specifico) di una carota estratta dalla struttura con quella del corrispondente calcestruzzo compattato a rifiuto di un provino (cubico o cilindrico) confezionato in corso di messa in opera.

Incrudito (acciaio incrudito)

Detto di acciaio che ha subito un trattamento che provoca un aumento della resistenza a scapito della plasticità.

Indurimento (del calcestruzzo)

Processo durante il quale il calcestruzzo, dopo la presa, acquisisce gradatamente la resistenza meccanica finale.

Interferro

Distanza minima tra le superfici esterne di due barre di armatura, parallele fra loro, inglobate in una struttura di calcestruzzo.

Mandrino di piegatura

Elemento circolare di contrasto che consente la piegatura delle armature secondo un preciso raggio di curvatura; il diametro del mandrino deve essere adeguato al diametro della barra da piegare, in modo da non rovinare l'acciaio nella fase di piega;

Massa volumica

Detta anche densità, è il rapporto tra la massa del materiale in esame e il suo volume; nel Sistema Internazionale si esprime in kN/m^3 .

Maturazione

Tempo, processo e condizioni che portano all'indurimento del calcestruzzo.

Miscela omogenea

Il conglomerato per il getto delle strutture di un'opera o di parte di essa si considera omogeneo ai fini del controllo (secondo le prestazioni), se possiede le medesime caratteristiche prestazionali (classi di resistenza e classe di esposizione).

Monoliticità

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

Movimentazione

Insieme delle operazioni di distribuzione del calcestruzzo, effettuate da parte dell'impresa esecutrice, dal mezzo di consegna fino al punto di messa in opera. La movimentazione può essere eseguita tramite benna e nastro trasportatore.

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 boiaccia cementizia.

Organismo strutturale

Insieme degli elementi strutturali.

Paramenti e intradossi in calcestruzzo (superfici)

Ognuna delle superfici laterali in calcestruzzo di una struttura quali pareti, pilastri pile, spalle, ecc. e delle superfici in calcestruzzo degli intradossi di solai e di impalcati, fianchi di travi di solai. Un paramento è una superficie in calcestruzzo che è destinata ad essere lasciata grezza e/o a ricevere un successivo trattamento e/o rivestimento dopo il disarmo della cassaforma e che devono essere conformi o non alle prescrizioni e i requisiti richiesti dalle specifiche progettuali e dal capitolato tecnico relative alle precisione dimensionale, di tessitura dell'elemento in calcestruzzo e compatibilità con i trattamenti e/o rivestimenti.

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 o indurito) su cui eseguire prove e/o determinazioni. Il prelievo di calcestruzzo per il controllo di accettazione consiste in due provini.

Presagomatura

L'attività di preparazione delle armature svolta in un centro di trasformazione.

Prestazione

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

Raggio di curvatura

È il raggio di curvatura delle armature determinato in fase di piegatura delle stesse; esso è importante perché deve garantire che gli sforzi trasmessi dall'acciaio al calcestruzzo, all'interno della piega, siano inferiori alla resistenza specifica del calcestruzzo stesso.

Reologia

Studia 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.

Ritiro plastico o da essiccamento o igrometrico

Contrazione del calcestruzzo nel corso del primo periodo di indurimento provocata dall'evaporazione dell'acqua di impasto verso l'ambiente insaturo di vapore.

Rotolo

Acciaio per calcestruzzo armato (generalmente tondo o filo), avvolto in anelli concentrici, ad aderenza migliorata nei diametri fino a 16 mm per l'acciaio B450C e fino a 10 mm per l'acciaio B450A.

SCC (Self Compacting Concrete) calcestruzzo autocompattante

Calcestruzzo che si compatta, anche in casseforme complesse, per effetto del solo peso proprio senza necessitare dell'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 del calcestruzzo nel corso della movimentazione o messa in opera.

Vibrazione (v. compattazione).

3. Specifiche progettuali e di capitolato

La documentazione necessaria alla realizzazione di un'opera in calcestruzzo deve comprendere almeno: la relazione di calcolo relativa alle singole parti della struttura (elementi, vincoli, ecc.) e all'intero organismo strutturale, nonché la documentazione di progetto. Quest'ultima è costituita da:

- 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 di esecuzione di strutture in calcestruzzo e le prescrizioni relative alle superfici, con le rispettive tolleranze e, per gli elementi prefabbricati, i dispositivi di stoccaggio, trasporto e movimentazione, la descrizione dettagliata delle procedure operative da adottare in fase di getto, compattazione, maturazione e disarmo dei getti di calcestruzzo;
- 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 e in forma dettagliata ed esaustiva nel Capitolato tecnico. Devono essere esplicitamente indicati: la classe di resistenza (Tabella 3.1), la classe di consistenza al getto ed il diametro massimo dell'aggregato, nonché la classe di esposizione ambientale, di cui alla norma UNI EN 206:2014 ed alla UNI 11104. Eventuali proprietà aggiuntive devono essere definite in sede di specifiche progettuali e di capitolato tecnico in termini di requisiti prestazionali;
- la descrizione delle opere, funzione della particolarità dell'opera, del clima e della tecnologia costruttiva, contenente: tutte le indicazioni necessarie alla messa in opera e all'esecuzione, con particolare riferimento a materiali e/o componenti di impiego inusuali 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;
- il piano di manutenzione dell'organismo strutturale dell'opera.

In particolare, fatte salve le disposizioni delle Norme tecniche, si definiscono le seguenti Classi di resistenza e Classi di consistenza:

Tabella 3.1 – Classi di resistenza e Classi di consistenza.

C8/10	Classe di consistenza	
C12/15		S1 – Umida
C16/20		S2 – Plastica
C20/25		S3 – Semifluida
C25/30		S4 – Fluida
C28/35		S5 - Superfluida
C30/37		
C32/40		
C35/45		
C40/50		
C45/55		
C50/60		
C55/67		
C60/75		
C70/85		
C80/95		
C90/105		

4. Gestione della qualità

La supervisione e l'ispezione dell'opera può essere effettuata in base a quanto previsto nella norma UNI EN 13670-2010. Tale norma utilizza, per le verifiche, tre classi di esecuzione, per le quali la severità aumenta da 1 a 3. La classe di esecuzione può essere riferita alla struttura completa, a componenti della struttura oppure ai materiali e alle tecnologie costruttive e deve essere dichiarata nella specifica di esecuzione (si può fare riferimento alle documentazioni elencate al paragrafo precedente).

Per quanto riguarda l'ispezione di materiali e prodotti (materiali per impalcature di sostegno, puntellamenti e/o attrezzature provvisorie di supporto, casseforme, acciaio per armature, precompressione degli elementi del sistema, calcestruzzo fresco, premiscelato o miscelato in sito, elementi prefabbricati), per completezza di informazione, richiamando la UNI EN 13670:2010, si ritiene utile riportare nel seguito:

- il prospetto 1, dove vengono indicati tipo e modalità dei controlli in funzione della classe di esecuzione;
- il prospetto 2, dove vengono indicati gli argomenti per l'ispezione dell'esecuzione e i requisiti da verificare in funzione della classe di esecuzione;
- il prospetto 3, dove, infine, viene indicato tipo e documentazione dell'ispezione, sempre in funzione della classe di esecuzione.

Prospetto 1 - UNI EN 13670:2010 Ispezione di materiali e prodotti.

Argomento	Classe di esecuzione 1	Classe di esecuzione 2	Classe di esecuzione 3
Materiali per impalcature di sostegno, puntellamenti e/o attrezzature provvisorie di supporto. Casseforme ^{a)}	In conformità ai punti 5.1 e 5.5 della UNI EN 13670:2010		
Acciaio per armatura ^{a)}	In conformità al punto 6.2 della UNI EN 13670:2010		
Precompressione dei componenti del sistema ^{a)}	Da non utilizzare in questa classe	In conformità al punto 7.2 della UNI EN 13670:2010	
Calcestruzzo fresco ^{a) c)} Premiscelato o miscelato in sito	In conformità ai punti 8.1 e 8.3 della UNI EN 13670:2010 Al ricevimento del calcestruzzo premiscelato deve essere presentata una bolla di consegna		
Altri elementi ^{a) b)}	In conformità alla specifica di esecuzione		
Elementi prefabbricati ^{a)}	In conformità ai punti 9.2 e 9.3 della UNI EN 13670:2010		
Rapporto di ispezione	Non richiesto	Richiesto	
<p>a) I prodotti che recano la marcatura CE o certificati da un organismo di certificazione approvato devono essere controllati rispetto alla bolla di consegna e visivamente. In caso di dubbio, si deve effettuare una ulteriore ispezione per controllare che il prodotto sia conforme alla specifica. Gli altri prodotti devono essere sottoposti a ispezione e a prove di accettazione come definito nella specifica di esecuzione.</p> <p>b) Per esempio, elementi come componenti di acciaio inglobati ecc.</p> <p>c) Se si utilizza il calcestruzzo prescritto, le proprietà pertinenti necessitano di essere controllate mediante prove.</p>			

Prospetto 2 - UNI EN 13670:2010 Argomenti per l'ispezione dell'esecuzione.

Argomento	Classe di esecuzione 1	Classe di esecuzione 2	Classe di esecuzione 3
Materiali per impalcature di sostegno, puntellamenti e/o attrezzature provvisorie di supporto. Casseforme	Secondo i requisiti di cui al punto 5 della UNI EN 13670:2010		
Elementi inglobati	Secondo i requisiti di cui al punto 5.6 della UNI EN 13670:2010		
Armature ordinarie	Secondo i requisiti di cui al punto 6 della UNI EN 13670:2010		
Armature da precompressione	Da non utilizzare in questa classe	Secondo i requisiti di cui al punto 7 della UNI EN 13670:2010	
Trasporto in cantiere e getto e maturazione del calcestruzzo	Secondo i requisiti di cui al punto 8 della UNI EN 13670:2010		
Montaggio di elementi prefabbricati di erezione	Secondo i requisiti di cui al punto 9 della UNI EN 13670:2010		

Prospetto 3 - UNI EN 13670:2010 Tipo e documentazione dell'ispezione.

	Classe di esecuzione 1	Classe di esecuzione 2	Classe di esecuzione 3
Tipo di ispezione	Ispezione visiva e misurazione a campione	Ispezione visiva e misurazioni sistematiche e regolari delle opere principali	Ispezione visiva Ispezione dettagliata di tutte le opere che sono significative per la capacità portante e la durabilità della struttura
Parte che svolge l'ispezione	Autoispezione	Autoispezione Ispezione in conformità alle procedure del costruttore Possibili requisiti addizionali secondo la specifica di esecuzione	Autoispezione Ispezione in conformità alle procedure del costruttore Requisiti addizionali secondo la specifica di esecuzione
Ambito	Tutte le opere	Oltre all'ispezione, ci deve essere un'ispezione sistematica e regolare delle opere	Oltre all'ispezione, ci deve essere un'ispezione sistematica e regolare delle opere
Rapporto di ispezione	Non richiesto	Richiesto	
Geometria come da costruzione	Non richiesto	Secondo la specifica di esecuzione	

5. 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 le verifiche riguardanti almeno: le casseforme, le attrezzature provvisorie di sostegno e/o di supporto, le armature metalliche e le attrezzature necessarie per il getto, per la compattazione e per la maturazione del calcestruzzo.

5.1 Casseforme

Le casseforme e le relative opere provvisorie di supporto, di sostegno e/o puntellamento devono essere progettate e realizzate in modo da contenere e/o sopportare le azioni e le sollecitazioni alle quali sono sottoposte nel corso della messa in opera del calcestruzzo ed essere idonee a garantire il rispetto delle dimensioni geometriche, delle tolleranze e dei requisiti di finitura della superficie del calcestruzzo previsti dalle specifiche del Capitolato tecnico.

In base alla loro configurazione le casseforme possono essere classificate per campo d'applicazione in:

- casseforme verticali, modulari, componibili e non, correate o non da componenti per le fasi del ciclo di costruzione per il corretto impiego in sicurezza delle stesse attrezzature provvisorie e da sistemi o componenti di puntellamento per la realizzazione fondazioni superficiali, muri, pareti, pilastri pile, spalle, pulvini, ecc.;

- casseforme orizzontali e/o inclinate, modulari o non, corredate o non da sistemi o componenti di puntellazione e/o di impalcature di sostegno e da componenti per il corretto impiego in sicurezza per la realizzazione di elementi edilizi orizzontali e/o inclinati;
- casseforme «dedicate» a specifiche realizzazioni, componibili o non, costituite da attrezzature provvisionali atte a contenere ed a sostenere il calcestruzzo durante il getto e la maturazione del calcestruzzo;
- casseforme a tunnel, idonee a realizzare contemporaneamente elementi edilizi orizzontali e verticali;
- casseforme a ripresa (dette anche rampanti), i cui dispositivi di sospensione sono ancorati al calcestruzzo precedentemente messo in opera, atte a realizzare strutture verticali, mediante il loro progressivo innalzamento tramite la movimentazione e il sollevamento delle stesse attrezzature provvisionali con apparecchi di sollevamento (gru, autogru, ecc.) o auto-sollevanti con meccanismi idraulici;
- casseforme scorrevoli, per realizzare opere che si sviluppino in altezza con continuità del ciclo di costruzione e produttivo;
- casseforme per manufatti prefabbricati in calcestruzzo;
- casseforme per gallerie e condotte;
- casseforme per specifiche metodologie costruttive per realizzare ponti, viadotti, infrastrutture, ecc. (attrezzature provvisionali per costruire archi in c.a. e strutture a travata reticolare composta acciaio-calcestruzzo collaborante, attrezzature provvisionali dette «carri varo» per singole travi o conci di travata, attrezzature provvisionali traslabili per la costruzione di impalcati composti in acciaio e c.a. collaborante, attrezzature provvisionali per la costruzione di impalcati a sbalzi successivi per getto in opera, attrezzature provvisionali per la costruzione di impalcati a sbalzi successivi per assemblaggio di conci prefabbricati, casseforme supportate da centine auto-varanti e carri varo per travature prefabbricate o conci di travata in c.a., costruzioni per estrusione di impalcati con tronconi prefabbricati di calcestruzzo o gettato in opera, tramite spinta di traslazione longitudinale degli stessi conci);
- casseforme per opere portuali;
- casseforme per opere idrauliche (dighe, canali, ecc.).

Le casseforme, corredate o meno da sistemi di supporto, componenti di puntellamento e/o di impalcature di sostegno, devono essere atte a consentire la realizzazione delle opere in conformità alle specifiche del Capitolato tecnico. Le casseforme e le relative opere provvisionali correlate devono mantenere la geometria degli elementi strutturali in calcestruzzo fino a quando il grado di maturazione del getto sia tale da consentire al calcestruzzo di raggiungere una resistenza sufficiente ad autoportarsi, prima che le casseforme possano essere rimosse. La geometria del calcestruzzo indurito deve essere conforme ai particolari costruttivi della documentazione progettuale e delle relative specifiche tecniche.

Le casseforme e le attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento devono essere progettate e realizzate in modo da:

- sopportare effettivamente le sollecitazioni applicate durante l'esecuzione delle opere;
- lasciare alle opere la libertà di deformazione eventualmente necessaria in corso di esecuzione;
- rispettare le tolleranze dimensionali e geometriche prescritte per le strutture;

- rispettare i requisiti richiesti in relazione alle tipologie ed alle classi di finitura delle superfici dei paramenti e/o degli intradossi di solai e di impalcati in calcestruzzo in conformità alle specifiche progettuali e del Capitolato tecnico;
- consentire corrette modalità operative d'impiego in sicurezza delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento.

Le casseforme e le attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento devono essere oggetto di specifico progetto, riferito alle specifiche configurazioni d'impiego previste per la realizzazione di elementi costruttivi in c.a.

È a cura dell'impresa esecutrice la scelta delle attrezzature provvisionali in grado di soddisfare le prescrizioni e i requisiti richiesti dalle specifiche progettuali e del capitolato tecnico, nonché la redazione dello specifico progetto delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento.

La resistenza e la stabilità delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento, sotto le azioni e le sollecitazioni che queste possono sopportare in esercizio, devono essere verificate in accordo ai metodi di calcolo previsti dalle norme tecniche in relazione alla relativa tipologia delle attrezzature provvisionali. Si devono applicare metodi di calcolo comprovati, con coefficienti di sicurezza adeguati all'effettiva conoscenza dei parametri in gioco come pure al loro grado d'indeterminatezza.

La redazione del progetto delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento deve essere corredata dalla seguente documentazione tecnica:

- programma dettagliato dei cicli d'impiego delle attrezzature provvisionali, in relazione ai procedimenti e alle modalità di costruzione;
- pianificazione operativa delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento;
- relazione tecnica corredata dalla redazione di calcolo delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento;
- disegni esecutivi d'impiego delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento;
- procedure operative specifiche ed istruzioni d'uso delle possibili configurazioni d'impiego delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento per la corretta messa in opera, impiego, trasformazione, smontaggio e le istruzioni di impiego pertinenti alle differenti specifiche configurazioni di allestimento e di installazione delle stesse attrezzature provvisionali.

I disegni esecutivi d'impiego delle casseforme, componibili e non, verticali e/o inclinate, così come delle casseforme dedicate a specifiche realizzazioni di elementi strutturali e delle relative attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento, devono riportare:

- le condizioni d'appoggio delle casseforme e delle attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento, che devono essere compatibili con la stabilità delle attrezzature provvisionali stesse, con le necessarie caratteristiche di resistenza del calcestruzzo e con quella del piano d'appoggio;
- le disposizioni che assicurano la stabilità delle attrezzature provvisionali nelle tre dimensioni dello spazio;

- le disposizioni da rispettare per il sollevamento, la movimentazione, la messa in opera e il disarmo delle attrezzature provvisionali;
- le tolleranze d'esecuzione delle casseforme e delle relative attrezzature provvisionali di sostegno.

Le casseforme verticali devono assicurare la corretta forma geometrica definitiva delle opere, tenendo conto della deformazione delle casseforme, delle deformazioni istantanee e ritardate dell'elemento strutturale, dovute a cause differenti. I disegni esecutivi d'impiego delle casseforme orizzontali e/o inclinate, così come delle casseforme dedicate a specifiche realizzazioni di elementi strutturali e delle relative attrezzature provvisionali di sostegno/puntellamento devono riportare:

- le condizioni d'appoggio dei montanti strutturali del puntellamento/impalcatura di sostegno che devono essere compatibili con la propria stabilità e con quella del piano d'appoggio;
- le disposizioni che assicurano la controventatura nelle tre dimensioni dello spazio;
- le disposizioni da rispettare per il sollevamento, la movimentazione, la messa in opera e il disarmo degli impalcati;
- le contro-frecce, eventualmente necessarie definite dal progetto strutturale per assicurarsi la corretta forma geometrica definitiva delle opere;
- le tolleranze d'esecuzione delle casseforme e del puntellamento/impalcatura di sostegno che costituiscono la carpenteria degli impalcati.

Le deformazioni delle casseforme orizzontali e/o inclinate e del relativo puntellamento/impalcatura di sostegno delle carpenterie devono essere compatibili con le tolleranze ammesse per l'esecuzione e non comprometterne il comportamento in esercizio.

Le deformazioni ammissibili devono essere giustificate tramite la relazione di calcolo da prodursi unitamente alla relazione tecnica.

Nella relazione tecnica e di calcolo devono essere messe in evidenza le disposizioni per il controllo delle deformazioni e dei cedimenti in funzione delle fasi di applicazione dei carichi sulle attrezzature provvisionali.

Le attrezzature provvisionali devono essere compatibili con le modalità dei cicli di costruzione, delle fasi di getto del calcestruzzo, della messa in opera delle stesse attrezzature e delle differenti metodologie di compattazione del calcestruzzo.

Le casseforme e le correlate opere provvisionali devono essere realizzate affinché agiscano in modo ammissibile sulle strutture alla quali sono ancorate o appoggiate in modo da permettere il ritiro del calcestruzzo ed un facile disarmo.

Le casseforme e le correlate opere provvisionali devono essere progettate in relazione alle procedure operative di disarmo ed effettuate in sicurezza per gli addetti alle differenti attività con metodi operativi conformemente alle fasi previste dal ciclo di costruzione delle opere ed alle fasi del ciclo d'impiego delle stesse attrezzature provvisionali senza scosse e con forze puramente statiche al fine di non recare alcun danno per il calcestruzzo. I puntellamenti/le impalcature di sostegno delle casseforme orizzontali e/o inclinate dovranno essere realizzate affinché agiscano in maniera ammissibile per le opere che esse sostengono e per quelle sulle strutture sottostanti sulle quali prendono appoggio.

I tiranti di collegamento delle casseforme contrapposte e i dispositivi di ancoraggio delle casseforme, qualora attraversino o siano inglobati nel calcestruzzo, non devono causare a quest'ultimo alcun danno. L'ammissibilità delle eventuali azioni trasmesse dagli ancoraggi annegati nel calcestruzzo dovrà essere verificata a cura del progettista che ha condotto lo studio della struttura in c.a.

La progettazione e la messa in opera delle casseforme deve tener conto della necessità di evitare durante la fase di getto perdite dannose di matrice cementizia. Generalmente la cassaforma è infatti ottenuta mediante l'accostamento di più unità o moduli di attrezzatura provvisoria; se tale operazione non è eseguita correttamente e/o i giunti non sono a tenuta, la matrice, o boiaccia cementizia, fuoriesce provocando difetti sulla superficie del calcestruzzo, eterogeneità nella tessitura e nella colorazione, nonché nidi di ghiaia. L'impermeabilità dei giunti fra le unità di cassaforma deve essere assicurata dal contatto diretto dei bordi del rivestimento della cassaforma. La tenuta dei giunti delle casseforme deve essere curata in modo particolare nelle strutture con finitura superficiale del calcestruzzo a vista; può essere migliorata utilizzando giunti preformati riutilizzabili o guarnizioni monouso.

Le casseforme devono essere classificate e dimensionate – a cura dell'impresa esecutrice – in funzione della massima pressione caratteristica ammissibile che il calcestruzzo fresco esercita sulle casseforme, tenendo presente che la resistenza caratteristica della cassaforma alla pressione del calcestruzzo fresco può variare da 20 a 150 kN/m². Il responsabile o il progettista della progettazione delle casseforme, incaricato dall'impresa esecutrice delle opere, determina la massima pressione caratteristica ammissibile che il calcestruzzo fresco esercita sulla cassaforma, tenendo conto particolarmente delle tipologie e delle caratteristiche del calcestruzzo fresco, delle modalità di getto e della velocità di innalzamento del calcestruzzo nelle casseforme. Le casseforme devono essere dimensionate in modo da minimizzare le deformazioni delle stesse per sopportare correttamente le sollecitazioni ipotizzate in base al tipo di calcestruzzo utilizzato.

È opportuno che eventuali prescrizioni relative alla qualità geometrica, al tipo di finitura, diretta o indiretta, della superficie del calcestruzzo e delle quattro classi di caratterizzazione dell'aspetto dello stesso calcestruzzo, in modo particolare del calcestruzzo a vista siano riportate nelle specifiche progettuali e del Capitolato tecnico.

Tutti i rivestimenti delle 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 devono essere scelti sulla base delle tipologie del rivestimento delle casseforme, delle quattro classi di caratterizzazione dell'aspetto delle superfici dei paramenti e/o degli intradossi e/o dei trattamenti ulteriori della superficie del calcestruzzo disarmata richieste dalle specifiche del Capitolato tecnico e dei trattamenti ulteriori della superficie del calcestruzzo disarmata. I prodotti disarmanti vengono applicati ai rivestimenti delle casseforme per agevolare il distacco del calcestruzzo, ma svolgono anche altre funzioni quali la protezione del rivestimento delle casseforme stesse (rivestimento metallico dall'ossidazione e della corrosione, l'impermeabilizzazione dei pannelli multistrati di legno) ed il miglioramento della qualità della superficie del calcestruzzo. La scelta del prodotto e la sua corretta applicazione influenzano la qualità delle superfici del calcestruzzo indurito, in particolare l'omogeneità di colore e l'assenza di bolle. L'impiego dei disarmanti è subordinato a prove preliminari atte a dimostrare che il distaccante non macchia e/o altera il colore e la finitura superficiale del calcestruzzo; a tal fine, prima di procedere al getto è sempre opportuno eseguire prove preliminari di compatibilità tra il calcestruzzo, il rivestimento della cassaforma e il disarmante.

È necessario contenere il tempo che intercorre fra l'applicazione del disarmante e l'esecuzione del getto, in funzione della struttura da realizzare, della tipologia e delle caratteristiche del disarmante e delle condizioni atmosferiche del cantiere, garantendo la piena efficacia del prodotto. L'applicazione del disarmante deve essere effettuata con cura, in strati sottili e regolari, prima del posizionamento delle gabbie di armatura. Il disarmante in eccesso è causa dell'apparizione di macchie e deve pertanto essere rimosso mediante dei panni o spugne. In fase d'applicazione i

prodotti disarmanti non devono mai venire a contatto con i ferri d'armatura, con il calcestruzzo indurito o con altri materiali che non costituiscono il rivestimento della cassaforma.

Le casseforme con rivestimenti 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 effettiva con acqua. Si deve altresì aver cura di eliminare ogni traccia di ruggine sulle casseforme con paramento/superfici di rivestimenti metallici.

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

Di seguito sono indicate le possibili precauzioni per evitare o almeno contenere i principali difetti delle casseforme e le relative conseguenze sulle strutture:

- utilizzare casseforme poco deformabili, casseforme non deformate, pannelli di rivestimento di spessore omogeneo;
- connettere correttamente le casseforme; sigillare i giunti con materiali idonei o guarnizioni, per evitare perdite di boiaccia e/o fuoriuscita d'acqua d'impasto, formazione di nidi di ghiaia;
- saturare con acqua il rivestimento delle casseforme, costituito da tavole in legno;
- usare un idoneo prodotto disarmante e/o impermeabilizzante, nel caso di rivestimenti delle casseforme con superficie troppo assorbente. In caso invece di superficie non assorbente, applicare correttamente il disarmante ed immettere il calcestruzzo dal fondo, per evitare la presenza di bolle superficiali. Infine pulire accuratamente le casseforme con rivestimento metallico, utilizzando un prodotto disarmante anticorrosivo, per evitare che la loro superficie si ossidi arrecando macchie di ruggine al calcestruzzo. Nell'applicare i prodotti disarmanti utilizzare idoneo metodo di applicazione di un film sottile di disarmante distribuendolo in modo omogeneo. Pulire accuratamente le casseforme dai residui dei precedenti impieghi, al fine di evitare macchie sul calcestruzzo e presenza di bolle d'aria. Curare l'applicazione del prodotto disarmante, in modo che non sia insufficiente, per evitare disomogeneità nel distacco.

Per realizzare strutture ed opere che si sviluppano in altezza sono frequentemente utilizzate le casseforme a ripresa mediante il loro progressivo innalzamento, ancorate nella sezione di getto del calcestruzzo precedentemente messo in opera e le casseforme scorrevoli. Le casseforme a ripresa si sorreggono sulla sezione di calcestruzzo indurito dei getti sottostanti, precedentemente messi in opera. Il loro ancoraggio del dispositivo di sospensione è realizzato mediante bulloni o piastre con 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 provvisorie a ripresa.

Questa tecnologia è finalizzata alla realizzazione di elementi strutturali a sviluppo verticale quali: pareti di costruzioni edilizie, pile di ponte, ciminiera, pareti di sbarramento (dighe), strutture industriali.

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

Le casseforme scorrevoli orizzontali, scivolano conferendo al calcestruzzo la sezione voluta. Sono utilizzate ad esempio per rivestimenti di gallerie, condotte d'acqua, rivestimenti di canali, pavimentazioni stradali e barriere spartitraffico.

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 vibratori, ma al rilascio della cassaforma deve essere sufficientemente rigido da 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 attrezzature di supporto delle casseforme e/o dalle stesse casseforme 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 collegare le armature con altri elementi metallici a contatto con l'ambiente;
- 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.

5.2 Strutture delle attrezzature provvisorie di sostegno e di supporto delle casseforme

Il progetto delle strutture delle attrezzature provvisorie di sostegno e di supporto delle casseforme 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, in particolare 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 e 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, ovvero la somma di quelle relative alle unità di cassaforma e alle strutture di supporto/sostegno, non deve superare le tolleranze geometriche previste e specificate per le strutture edilizie e opere di ingegneria civile completate.

Qualora apposite istruzioni al riguardo non siano espressamente contenute nel Capitolato tecnico, è opportuno che sia predisposto un documento in cui raccogliere le indicazioni necessarie al montaggio ed allo smontaggio delle strutture di supporto/di sostegno, ecc., 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 relative alle attrezzature provvisorie sono provocate da carichi statici e da carichi accidentali di servizio. I carichi statici sono rappresentati dal peso delle casseforme, delle armature metalliche e del calcestruzzo mentre i carichi dinamici (verticali) sono quelli 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.

La massima pressione possibile che il calcestruzzo fresco esercita sulle casseforme, risulta in genere $p = w * h$, dove:

p = pressione laterale (kN/m^2)

w = peso per unità di volume (kN/m^3)

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

Condizioni di getto del calcestruzzo particolari possono dare origine ad andamenti più sfavorevoli delle pressioni esercitate dal calcestruzzo fresco sulle casseforme.

La pressione del calcestruzzo fresco è da tener conto quale carico statico per la progettazione strutturale delle casseforme verticali.

5.3 Armature per calcestruzzo

Le armature per opere in calcestruzzo armato sono ottenute tramite le operazioni di taglio a misura, piegatura, saldatura e assemblaggio, delle barre di acciaio. Tali lavorazioni possono avvenire all'interno del cantiere o in appositi stabilimenti definiti Centri di Trasformazione. Ne consegue che nelle operazioni di verifiche e controllo bisogna verificare non solo le caratteristiche metallurgiche dell'acciaio ma anche la precisione e correttezza delle operazioni di taglio, piegatura, raddrizzatura, saldatura ed assemblaggio delle armature.

5.3.1 Verifica delle forniture

Il Direttore dei Lavori, prima della messa in opera, è tenuto a verificare che tutte le forniture di acciaio per c.a. provenienti direttamente dallo stabilimento di produzione siano accompagnate dalla documentazione richiesta dalle Norme tecniche vigenti.

Dopo aver verificato la documentazione, il Direttore dei Lavori deve vigilare sulle lavorazioni in cantiere ed effettuare i seguenti controlli:

- verifica della etichettatura del fascio di barre. Ciascun fascio dovrà essere regolarmente etichettato. Sull'etichetta dovranno essere riportati i riferimenti al tipo di prodotto (es. B450 C/B450A), diametro, lunghezza della barra, peso e al N° di colata (Figura 1);
- verifica del marchio di laminazione dell'acciaio. La Direzione Lavori dovrà verificare la corrispondenza del marchio di laminazione riportato sulla barra con quello riportato sull'attestato di qualificazione (Figura 2).

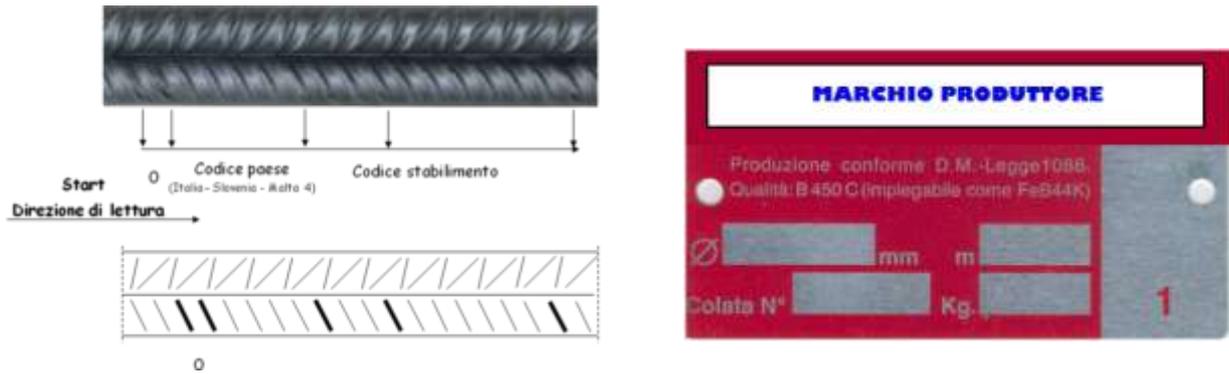


Figura 1: Esempio di marchio di laminazione e di etichetta.



Figura 2: Esempio di attestato di qualificazione di ferriera del Servizio Tecnico Centrale.

5.3.2 Processo di sagomatura delle armature per c.a.

I processi di sagomatura adottati, sia nel Centro di Trasformazione che in cantiere, devono essere eseguiti in coerenza con quanto riportato nel Cap. 6 e nell'Allegato D della Norma UNI EN 13670:2009.

In particolare sono richiesti i seguenti requisiti:

- la piegatura deve essere effettuata in un'unica operazione. Qualora si impieghino macchine piegatrici automatiche, la piegatura può essere continua o sequenziale;
- la piegatura dell'acciaio in condizioni con temperature inferiori ai - 5° C è consentita solo se autorizzata nelle specifiche di esecuzione e a condizione che le procedure adottate siano conformi alle necessarie precauzioni aggiuntive;
- la piegatura tramite il riscaldamento delle barre non è consentita a meno che non sia autorizzata nelle specifiche di esecuzione.

Nelle operazioni di piegatura vanno rispettate per i mandrini le limitazioni dimensionali minime indicate in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 - Diametro minimo dei mandrini di piegatura.

Φ barra o rotolo in mm	Diametro del mandrino di piegatura (D in mm)
≤ 16	4 volte
> 16	7 volte

I parametri indicati in Tabella 5.1 e le conseguenziali dimensioni minime d'ingombro realizzabili con gli stessi, sono da considerarsi vincolanti per tutte le operazioni di sagomatura.

Qualora i disegni esecutivi riportino sagome con angoli e dimensioni incompatibili con i mandrini minimi di cui alla Tabella 2 – e non sia esplicitata per le stesse apposita autorizzazione di eseguire la sagomatura in deroga alla Norma da parte del Progettista o della Direzione Lavori del cantiere a cui sono destinate le armature – il presagomatore è tenuto a modificare le stesse, laddove la struttura di destinazione lo consenta, affinché rientrino nei parametri di sagomatura richiesti dalla Norma o, in caso contrario, a non realizzarle fintanto che gli venga inviata dal proprio Cliente l'autorizzazione di cui sopra. Le modalità operative di sagomatura devono essere definite nelle procedure/istruzioni di lavorazione.

Per assicurare il rispetto di quanto previsto sul diametro minimo dei mandrini da utilizzare in fase di sagomatura, bisogna prevedere per i lati risultanti dalla piegatura, come indicato in Figura 3, le lunghezze minime riportate nella successiva Tabella 5.2.

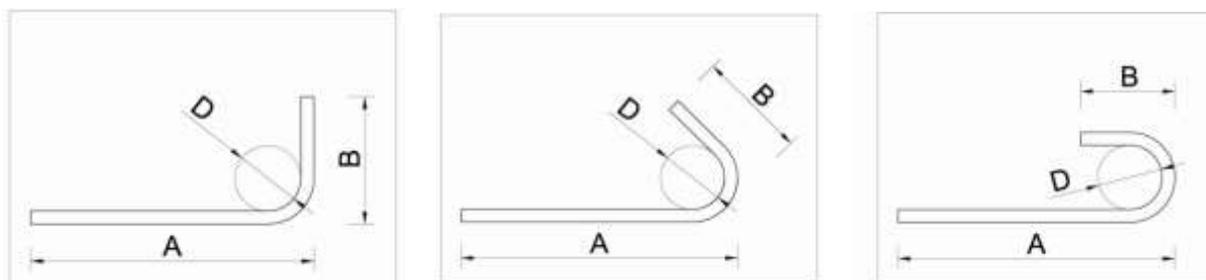


Figura 3: Sagome tipo.

Tabella 5.2 - Misura minima di “ingombro” dei lati.

Diametro barra (mm)	Diametro minimo del mandrino (D in mm)	Lato B (cm)	Esempio serie di mandrini utilizzabile (D in mm)
6	24	10	42
8	32	10	42
10	40	10	42
12	48	12	65
14	56	14	65
16	64	16	65
18	126	18	130
20	140	22	160
22	154	22	160
24	168	26	182
25	175	26	182
26	182	26	182
28	196	30	210
30	210	30	210

In caso di forniture di armature presaldate, presagomate e/o preassemblate da un Centro di trasformazione, il Direttore dei Lavori deve verificare preliminarmente il possesso, da parte del Centro, dei requisiti richiesti dalla normativa vigente, in particolare acquisire gli estremi della certificazione attestante il possesso dei predetti requisiti. Un Centro di Trasformazione privo di tale certificazione non può fornire acciaio presagomato per strutture in c.a..

Il Direttore dei Lavori deve pertanto verificare che ogni fornitura in cantiere di armature presaldate, presagomate e/o preassemblate sia sempre accompagnata dalla documentazione di cui sopra.

Con riferimento alle attuali Norme tecniche sulle costruzioni, di cui al DM 14.01.2008, si riporta nel seguito (Figura 4) un esempio di attestato di denuncia dell'attività del Centro di Trasformazione del Servizio Tecnico Centrale.

Inoltre, alla consegna dell'acciaio presagomato in cantiere, unitamente al controllo documentale di cui sopra, la Direzione Lavori deve verificare, sui colli di fornitura, la presenza di etichette identificative riportanti il marchio e/o logo del Centro di Trasformazione, che deve corrispondere a quello indicato sull'Attestato di denuncia dell'attività, nonché verificare la presenza del previsto Documento di Trasporto (Figura 5).

L'impresa costruttrice, che riceve i documenti suindicati, ne riporta gli estremi all'interno dell'apposito "Registro", tramite il quale deve essere sempre consentita la rintracciabilità dell'acciaio impiegato nelle varie parti della struttura.

**ATTESTATO DI DENUNCIA DELL'ATTIVITA' DI
CENTRO DI TRASFORMAZIONE**
N. XX/12

In conformità al DM 14 gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" si attesta che la Ditta
(NOME PRODUTTORE)
per il proprio stabilimento di:
(INDIRIZZO PRODUTTORE)

ha depositato presso il Servizio Tecnico Centrale la documentazione inerente il possesso dei requisiti richiesti dalla norma per la lavorazione dell'acciaio finalizzata alla:

SAGOMATURA FERRO PER C.A.

Ogni confezione del prodotto lavorato è riconducibile alla Ditta di cui sopra, con tutte le informazioni utili ad individuare la commessa, attraverso la seguente etichetta:

(LOGO
PRODUTTORE)

Il presente attestato di deposito ha il solo obiettivo di identificare il Centro di Trasformazione. In tal senso l'attestato di deposito non è finalizzato a conferire la concreta idoneità tecnica del prodotto di lavorazione alle diverse utilizzazioni cui può essere destinato e non può trasferire la responsabilità del Centro di Trasformazione e del progettista al Servizio Tecnico Centrale, restando nella responsabilità delle figure suddette ogni specifica applicazione del prodotto. Il presente attestato ha validità sino a che le condizioni iniziali, sulla base delle quali è stato rilasciato, non subiscano modifiche significative.

Roma, DATA: _____

IL DIRIGENTE DELLA DIVISIONE II DEL
SERVIZIO TECNICO CENTRALE

Via Nomentana, 2 - 00101 ROMA -
TEL. 06.4412.4100 - FAX 06.4426.7581

Decreto 28/02/2008 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Decreto 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Figura 4: Esempio di attestato di denuncia dell'attività del Centro di Trasformazione del Servizio Tecnico Centrale.

**LOGO E
INTESTAZIONE
PRODUTTORE**

DIREZIONE
Edil Costruzioni
via Italia 1
0000 Roma (RM)
Ufficio di Intestazione
Via Lazio n°1, Roma

FATTURA ACCOMPAGNATORIA

COE (C)	COE (P)	COE (R)	COE (S)	COE (T)	COE (U)	COE (V)	COE (W)	COE (X)	COE (Y)	COE (Z)
099999	1700000000000	0000000000								
CANTIERE			Da concordare		4765		22-10-10		L/1	
AP	ACCIAIO PRESAGOMATO MISTO BAGGOLI - TIPO A & B Materiale prodotto il 23/09/2010, 24/09/2010. Si dichiara che il medesimo giorno sono state effettuate le prove previste dal punto 11.3.2.10.3 del DM 14/01/2008	1	3,560							
CONTINUITO COME ASSOLTO										

Nota: I foggiati realizzati con opere di campo sono stati provati esclusivamente per confermarne la qualità, è vietato utilizzarli per il rafforzamento e la manutenzione del materiale. (Art. 4° 212855 del DM 14/01/2008)

COE (C)	COE (P)	COE (R)	COE (S)	COE (T)	COE (U)	COE (V)	COE (W)	COE (X)	COE (Y)	COE (Z)
099999	1700000000000	0000000000								
CANTIERE			Da concordare		4765		22-10-10		L/1	
CONTINUITO COME ASSOLTO										

Nota: I foggiati realizzati con opere di campo sono stati provati esclusivamente per confermarne la qualità, è vietato utilizzarli per il rafforzamento e la manutenzione del materiale. (Art. 4° 212855 del DM 14/01/2008)

COE (C)	COE (P)	COE (R)	COE (S)	COE (T)	COE (U)	COE (V)	COE (W)	COE (X)	COE (Y)	COE (Z)
099999	1700000000000	0000000000								
CANTIERE			Da concordare		4765		22-10-10		L/1	
CONTINUITO COME ASSOLTO										

Figura 5: Esempio di Documento di Trasporto di acciaio presagomato.

5.3.3 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.

Nella posa in opera delle armature devono poi essere rispettate:

- le tolleranze di posizionamento definite nella documentazione progettuale;
- lo spessore del copriferro nominale;
- l'interferro.

Il copriferro, come definito al Paragrafo 2, è la distanza tra le superfici dell'armatura 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} a cui deve essere aggiunto, in sede progettuale, un incremento Δh per tener conto della tolleranza.

Sia per il copriferro che per l'interferro valgono le indicazioni del paragrafo 4.1.6.1.3 delle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti. Nella verifica dei predetti valori è opportuno utilizzare adeguati calibri o spessori.

5.3.4 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.

La sovrapposizione deve essere calcolata in modo da assicurare l'ancoraggio di ciascuna barra; in ogni caso la lunghezza di sovrapposizione, per le barre rette, 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 4 volte il diametro.

Nelle unioni di sovrapposizione può essere necessario, in taluni casi, 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.

6. Trasporto, messa in opera e compattazione del calcestruzzo

Il calcestruzzo, dopo essere stato confezionato presso l'impianto di betonaggio è trasportato in cantiere per la realizzazione delle strutture dove, nella fase di messa in opera, viene gettato nelle casseforme e compattato per ottenere le tipologie di finitura e classe d'aspetto della superficie del calcestruzzo prescritte nelle Specifiche progettuali e di Capitolato tecnico.. La fase di messa in opera del calcestruzzo, fortemente condizionata dal personale addetto, è fondamentale per la realizzazione di strutture con caratteristiche rispondenti a quanto previsto in fase progettuale.

Ai fini della buona esecuzione delle operazioni di getto, compattazione e finitura, sono fondamentali, fra le altre, due caratteristiche del calcestruzzo che possono essere prescritte già in fase progettuale:

- la classe di consistenza, che rappresenta l'indice di lavorabilità del calcestruzzo. Più alta è la classe di consistenza alla consegna e minore è lo sforzo che deve essere applicato al calcestruzzo per la corretta messa in opera. La classe di consistenza ottimale dipende dal tipo di elemento strutturale da gettare, dal sistema di getto e dai mezzi disponibili per la compattazione e può essere valutata secondo i seguenti metodi di prova:
 - Prove sul calcestruzzo fresco – prova di abbassamento al cono (UNI EN 12350-2);
 - Prove sul calcestruzzo fresco – prova Vebé (UNI EN 12350-3);
 - Prove sul calcestruzzo fresco – compattabilità (UNI EN 12350-4);
 - Prove sul calcestruzzo fresco – spandimento alla tavola a scosse (UNI EN 12350-5);
 - Prova dello Slump Flow in caso di calcestruzzi autocompattanti(UNI EN 12350-8);
- il mantenimento della classe di consistenza, ovvero la capacità del calcestruzzo di mantenere la stessa classe di consistenza nel tempo. Fondamentale per garantire la costanza di messa in opera ed evitare modifiche del prodotto in cantiere. La garanzia del mantenimento della classe di consistenza intesa come il tempo di mantenimento della classe di consistenza, definita contrattualmente tra le parti, è quindi una prescrizione aggiuntiva molto importante che deve tenere conto dei tempi di attesa delle autobetoniere (intervallo di tempo fra arrivo in cantiere ed inizio scarico) e dalla velocità di messa in opera del calcestruzzo.

Per la realizzazione di tutte le strutture ed in particolar modo per quelle complesse per cui sono necessari calcestruzzi con caratteristiche prestazionali particolari o innovative, o nel caso di getti in condizioni ambientali difficili (per es. alte/basse temperature) è consigliabile consultare il produttore di calcestruzzo fin dalla fase di progettazione in modo da definire classe di consistenza e mantenimento in funzione del progetto, nonché tutte le eventuali prestazioni aggiuntive utili per una migliore riuscita del getto.

Si consiglia inoltre in fase di realizzazione di confrontare i tempi di attesa-getto di progetto con quelli reali in modo da apportare le opportune variazioni durante la pianificazione dei getti alle prestazioni del calcestruzzo richieste al produttore.

6.1 Trasporto del calcestruzzo fresco

Il trasporto del calcestruzzo, dal sito di confezione al luogo d'impiego, deve essere effettuato con mezzi adeguati a garantire il mantenimento delle prestazioni previste nel progetto, attesa la notevole influenza che possono avere in tal senso i sistemi e le modalità di produzione e trasporto.

Il mezzo di trasporto più diffuso, l'autobetoniera, mantiene in agitazione il calcestruzzo con rotazione a bassi giri del tamburo. L'autobetoniera, tuttavia, non è ottimale per trasportare calcestruzzi di classe di consistenza quali "terra umida" o S1. In questo caso, infatti, sarebbe più idoneo l'autocarro cassonato. Tuttavia quest'ultimo, se non dotato di copertura, non offre alcuna protezione al calcestruzzo durante il trasporto; in ogni caso deve essere pertanto evitata l'esposizione diretta del calcestruzzo a forte irraggiamento solare o pioggia durante il trasporto.

In entrambi i casi (trasporto con autobetoniera o con autocarro cassonato) la durata del trasporto deve essere comunque compresa all'interno del tempo di mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo considerato dalla fine del confezionamento del calcestruzzo all'impianto di

betonaggio; in ogni caso, in mancanza della prescrizione sul tempo di mantenimento della lavorabilità, il calcestruzzo dovrebbe essere messo in opera entro e non oltre due ore dal confezionamento.

Per ogni carico di calcestruzzo si predispone il documento di trasporto (DDT) che deve contenere:

- a) gli estremi fiscali del fornitore e l'ubicazione dell'impianto di produzione;
- b) gli estremi del destinatario ed il cantiere di destinazione;
- c) il vettore;
- d) la targa del mezzo;
- e) il numero del Certificato FPC (univoco);
- f) l'indicazione della quantità da consegnare, espressa in metri cubi;
- g) le informazioni relative agli orari, e in particolare:
 - data e ora di carico, ovvero ora del primo contatto tra acqua e cemento;
 - ora di arrivo del mezzo in cantiere;
 - ora di inizio dello scarico ed ora entro la quale deve essere completato;
- h) la descrizione del prodotto, oltre all'eventuale denominazione commerciale propria di ciascuna azienda.

Gli altri elementi da inserire nel documento di trasporto (DDT), per il calcestruzzo a prestazione garantita, sono almeno:

- la CLASSE DI RESISTENZA (uno dei valori riportati in Tabella 1. Per esempio "C32/40", esprimibile anche come "Rck 40");
- la CLASSE DI CONSISTENZA (uno dei valori riportati in Tabella 3.1);
- la CLASSE DI ESPOSIZIONE AMBIENTALE, come definite dal paragrafo 4.1.2.2.4.3 della vigenti Norme tecniche;
- il DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO ("Dmax" o semplicemente "D" seguito da un numero, inteso come diametro massimo nominale. Per esempio "D16", "D20" o "D30". Il diametro massimo riportato in bolla può essere diverso da quello di progetto riportato nelle tavole progettuali e nel capitolato, deve essere comunque rispettato il rapporto $D_{max} \leq D$ progetto).

Nel caso particolare di trasporto di calcestruzzo a composizione richiesta, la descrizione del prodotto deve contenere almeno:

- il CONTENUTO di cemento (espresso in kg/mc);
- il TIPO e la CLASSE del cemento;
- il CONTENUTO ed il TIPO dell'eventuale additivo e/o aggiunta (inteso anche come denominazione commerciale);
- il RAPPORTO ACQUA/CEMENTO (espresso in decimali, per esempio "0,55") oppure, in alternativa, la CLASSE DI CONSISTENZA;
- il DIAMETRO MASSIMO DELL'AGGREGATO;
- la composizione granulometrica della miscela di aggregati.

E' opportuno rammentare che per il calcestruzzo a composizione richiesta il prescrittore deve assicurare, mediante adeguata documentazione di supporto, che la specifica del calcestruzzo sia conforme ai principi generali della UNI EN 206 e che la composizione specificata consenta di raggiungere le prestazioni desiderate allo stato fresco ed indurito.

Il produttore di calcestruzzo è tenuto a garantire quanto contenuto nelle prescrizioni pertanto, nel caso di calcestruzzo a composizione richiesta, il produttore non può fornire alcuna garanzia in merito alle prestazioni (da UNI 11104:2016).

L'impresa costruttrice conserva la documentazione nella quale è specificata l'elemento strutturale a cui il carico di calcestruzzo è stato destinato e ne riporta gli estremi all'interno di un apposito Registro dei getti e dei prelievi, al fine di consentire la rintracciabilità, tra singoli DDT del calcestruzzo, delle parti dell'opera strutturale ove lo stesso è stato posto in opera e dei relativi certificati di prova. Tale documento deve formare oggetto di controllo da parte del Direttore dei Lavori e del Collaudatore delle strutture.

Ogni non conformità o problematica relativa al prodotto di cui il produttore di calcestruzzo abbia avuto notizia (sia durante la produzione che successivamente alla stessa) deve essere prontamente comunicata al cliente per le azioni del caso. A tale proposito il produttore del calcestruzzo dovrebbe conservare per almeno 2 anni dalla fornitura del calcestruzzo tutti i documenti relativi al prodotto quali report di produzione, certificati di origine dei materiali, dichiarazioni di conformità CE dei costituenti, report di prove, etc.

6.2 Controlli di qualità del calcestruzzo

Il controllo di qualità del calcestruzzo in cantiere deve essere effettuato in conformità alle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti. I controlli del calcestruzzo in cantiere rappresentano uno dei momenti più importanti nella realizzazione di un'opera, per le conseguenze che comportano in termini di qualità del costruito e di responsabilità in caso di contestazioni. A tal fine è importante distinguere i controlli di accettazione e i controlli di conformità del calcestruzzo.

I primi sono obbligatori ai sensi delle Norme tecniche per le costruzioni vigenti e costituiscono un elemento fondamentale per la garanzia sulla sicurezza dell'opera; le vigenti Norme tecniche per le costruzioni attribuiscono la responsabilità di tali controlli interamente alla Direzione dei Lavori.

I secondi sono facoltativi, e servono all'impresa per verificare le condizioni di fornitura pattuite contrattualmente col produttore e per questo motivo vengono effettuati in contraddittorio con quest'ultimo. In nessun caso i prelievi effettuati ai fini dei controlli di conformità potranno essere utilizzati dalla D.L. per i controlli di accettazione.

I controlli di accettazione possono essere delegati dal Direttore dei Lavori ad un tecnico di propria fiducia solo per quanto concerne le operazioni di prelievo e conservazione dei provini, mentre la responsabilità resta in capo al Direttore dei Lavori. Questi controlli sono fondamentali per la collaudabilità dell'opera, pertanto è fondamentale eseguirli nel rispetto della normativa e del principio della terzietà.

La Direzione dei Lavori deve provvedere alla redazione del verbale di prelievo e disporre l'identificazione dei provini mediante sigle, etichettature indelebili e tutto il necessario per la tracciabilità dei campioni, attendendosi scrupolosamente alle regole per il loro confezionamento e la loro conservazione.

La sottoscrizione della domanda di prove al Laboratorio Ufficiale o Autorizzato da parte del Direttore dei Lavori deve essere subordinata alla redazione del verbale di prelievo. Tale domanda deve contenere precise indicazioni sulla posizione delle strutture interessate da ciascun prelievo e il riferimento al verbale.

I controlli di conformità sulle forniture, sotto il profilo contrattuale, avvengono, invece, in contraddittorio tra il fornitore e l'impresa sul calcestruzzo prelevato "alla bocca dell'autobetoniera", ed hanno come oggetto la verifica della conformità delle proprietà del calcestruzzo con quelle previste nel contratto di acquisto.

Fermo restando l'obbligo dei controlli di accettazione, da certificare da uno dei laboratori di cui all'art.59 del DPR n.380/2001, mediante prove su campioni a 28 giorni di maturazione, si può anche procedere in cantiere ad ulteriori controlli di conformità, generalmente su campioni di calcestruzzo fresco o comunque con tempi di maturazione inferiori ai 28 giorni, al fine di verificare la rispondenza del calcestruzzo alle prescrizioni dei capitolati speciali d'appalto ed alle normative di settore.

Tra le caratteristiche oggetto di controllo sul calcestruzzo fresco la più frequente è sicuramente la consistenza del calcestruzzo valutata mediante prelievo a bocca di betoniera. Un'altra caratteristica oggetto di controllo può essere il contenuto d'aria, nel caso di calcestruzzi aerati, attraverso l'impiego del porosimetro, uno strumento in grado di misurare la quantità d'aria presente nella miscela.

I controlli di conformità possono interessare anche le proprietà del calcestruzzo indurito, verificabili su provini confezionati sempre con calcestruzzo prelevato "alla bocca dell'autobetoniera" durante lo scarico in cantiere.

Infatti è possibile richiedere le prove a compressione per valutare la resistenza a 1, 2, 3, 7 giorni, per esigenze esecutive di cantiere, oppure per valutare il ritiro o la viscosità del calcestruzzo.

Una volta verificata la rispondenza dei risultati dei controlli di conformità sul calcestruzzo fresco con i requisiti richiesti nell'ordine, la fornitura è accettata dall'impresa per quanto riguarda tali requisiti. Le proprietà del calcestruzzo fornito non devono essere alterate dall'impresa durante la posa in opera.

L'alterazione del calcestruzzo in cantiere da parte dell'impresa durante le operazioni di getto non solo pregiudica la qualità e la sicurezza dell'opera, ma potrebbe dare luogo ad implicazioni legali, essendo l'impresa responsabile della qualità del calcestruzzo dopo l'avvenuta consegna in cantiere da parte del fornitore.

Aggiunte di componenti da parte di personale del fornitore di calcestruzzo al carico consegnato in cantiere sono possibili solo se espressamente previste al momento del progetto del calcestruzzo e riportate sul documento di trasporto o su altro documento del fornitore. Resta ferma la garanzia di tutte le proprietà previste nel contratto di acquisto.

6.3 Messa in opera del calcestruzzo

La fornitura del calcestruzzo, come già visto, comprende tutte le operazioni preliminari alla posa in opera, che occorrono per il trasporto e la consegna del calcestruzzo fino al punto di scarico e viene eseguita a cura dell'impresa fornitrice di calcestruzzo. Analogamente, è cura dell'impresa esecutrice dei lavori la fase di messa in opera del calcestruzzo, che comprende anche le operazioni di movimentazione, compattazione e maturazione 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 maturazione del calcestruzzo.

6.3.1 Fornitura del calcestruzzo

Come già accennato, la fornitura del calcestruzzo dal mezzo di trasporto al punto di scarico può essere effettuata mediante autobetoniera oppure mediante pompa. Il mezzo di consegna deve essere scelto tenendo in considerazione le caratteristiche del calcestruzzo allo stato fresco, l'elemento da realizzare e di altre informazioni riguardanti la logistica del cantiere quali 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 durata, ovvero il tempo, prevista del ciclo di messa in opera del calcestruzzo. Tali informazioni devono essere fornite dall'impresa esecutrice al produttore di calcestruzzo.

Nel caso delle autobetoniere, queste sono generalmente attrezzate con canalette che consentono la distribuzione diretta del calcestruzzo entro il raggio d'alcuni metri. L'uso della canaletta è idoneo solo nel caso di calcestruzzi aventi classe di lavorabilità S4 – S5, oppure nel caso di calcestruzzi autocompattanti (SCC). Al fine di ottenere una corretta messa in opera, la canaletta deve avere pendenza e lunghezza compatibili con la classe di consistenza del calcestruzzo. 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 l'impresa esecutrice predispone una idonea tramoggia che accompagni 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.

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 idonei a sopportare il carico statico e dinamico del calcestruzzo. Durante le operazioni di getto, gli operatori dell'impresa esecutrice devono vietare lo stazionamento e il passaggio al di sotto della canaletta, ed indossare gli idonei DPI.

Successivamente alla fornitura del calcestruzzo gli addetti all'autobetoniera procedono al lavaggio della stessa conservando, di prassi, nel tamburo del mezzo le acque di lavaggio.

L'uso della pompa è anch'esso idoneo solo nel caso di calcestruzzi aventi classe di lavorabilità S4 – S5, oppure nel caso di calcestruzzi autocompattanti (SCC). Le pompe per calcestruzzo, in base alle loro caratteristiche, possono essere così classificate:

- pompe su autocarro, o 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 è ubicato entro 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 e, in alcuni casi (grattacieli, alte pile di ponti, ecc.), 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 ad 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.

Anche le tubazioni fisse devono essere disposte dal lavoratore dell'impresa esecutrice 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 che

l'impresa fornitrice verifichi 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.

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. È 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 che l'operatore pompista effettui la pulizia del sistema.

Il lavoratore dell'impresa fornitrice deve evitare l'impiego della pompa in caso di velocità del vento superiore ai limiti imposti dal fabbricante nel manuale d'uso e manutenzione. Il dirigente/preposto o un incaricato dell'impresa esecutrice dei lavori deve, inoltre, vietare la sosta nei pressi del canale di getto nella fase iniziale del getto stesso e non consentire la sosta e il passaggio nelle immediate vicinanze delle tubazioni poiché la pressione di alimentazione può provocare forti oscillazioni e spostamenti, con conseguente rischio di urti e colpi violenti. Deve, inoltre, verificare che il lavoratore addetto alla tubazione non lasci mai incustodito il terminale di gomma della pompa per prevenire eventuali contraccolpi dovuti a variazioni interne nella pressione di erogazione.

Nell'eventualità di intasamento della tubazione di getto, il lavoratore dell'impresa fornitrice deve effettuare la manovra di disintasamento allontanando la parte terminale della tubazione dagli addetti alla posa, per evitare le conseguenze derivanti da un eventuale "colpo di frusta", causato dalla pressione immessa.

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.

6.3.2 Movimentazione del calcestruzzo

La distribuzione del calcestruzzo può essere effettuata mediante benna o nastro trasportatore. Come per la fornitura, anche in questo caso, la scelta del mezzo di movimentazione è funzione delle peculiarità dell'opera e in particolare delle caratteristiche del calcestruzzo allo stato fresco, dell'elemento da realizzare, della distanza tra il punto d'arrivo del mezzo e quello di getto, delle condizioni climatiche, della conformazione delle casseforme e del cantiere, delle attrezzature di compattazione disponibili e della velocità d'avanzamento prevista.

La benna o "secchione" 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 l'impresa esecutrice 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.

Le specifiche del calcestruzzo idoneo ad essere movimentato mediante benna riguardano sostanzialmente la classe di consistenza, che deve essere tale da far defluire il calcestruzzo dalla bocca senza segregare (classi S3, S4, S5).

Per distribuire il calcestruzzo entro le casseforme delle strutture verticali, evitando la caduta libera che provoca la segregazione, è consigliabile l'impiego di un tubo getto con tramoggia 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 metodologia di distribuzione del calcestruzzo implica l'immersione del tubo getto a distanze tra due punti adiacenti di scarico è in funzione della classe di consistenza del calcestruzzo e quindi è particolarmente importante per i calcestruzzi fluidi (classe di consistenza S4 secondo la norma UNI EN 206:2014) e per quelli autocompattanti (le Linee Guida Europee e la Norma UNI EN 206).

La distribuzione mediante nastro è condizionata dalle proprietà del calcestruzzo che non deve segregare, non deve essiccare in modo rilevante e non deve "aderire" al nastro. L'uso del nastro è, infatti, idoneo solo nel caso di calcestruzzi aventi classe di lavorabilità S1 – S2 (eventualmente anche S3). 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 idonea per calcestruzzi di consistenza plastica (S3) o meno fluidi, senza limitazioni per la dimensione massima dell'aggregato.

6.3.3 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;
- il coordinamento con i fornitori e subappaltatori, con il dovuto anticipo, per la consegna del calcestruzzo delle caratteristiche prescritte;
- nel caso di calcestruzzo confezionato, 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 maturazione del calcestruzzo, in funzione dei volumi, delle sequenze e degli spessori dei getti, della distribuzione e compattazione del calcestruzzo, della protezione e maturazione 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.);

- la stesura del disarmante sul rivestimento delle casseforme o l'umidificazione a rifiuto delle superfici assorbenti, quali tavole o pannelli multistrato di legno non trattato, dei rivestimenti delle casseforme.

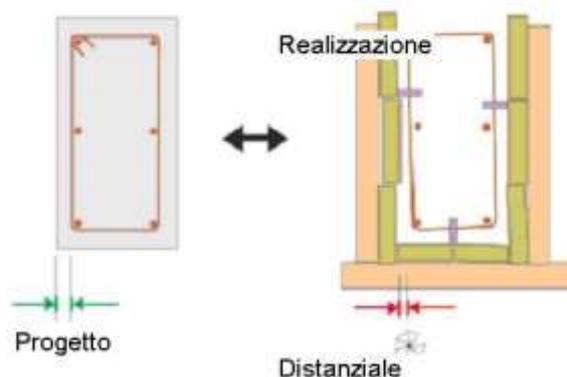


Figura 6: Punti di controllo della cassaforma, dell'armatura e del copriferro.

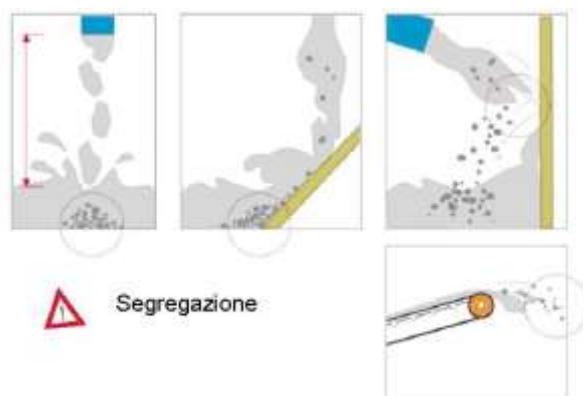


Figura 7: Errori nella posa in opera del calcestruzzo.

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.

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 7.

È opportuno che l'altezza di caduta libera del calcestruzzo fresco, indipendentemente dal sistema di distribuzione 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 (Figura 8).

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 rimanga sempre immerso nel calcestruzzo al fine di consentire al calcestruzzo di rifluire verso alto all'interno di quello precedentemente messo in opera. La funzionalità delle attrezzature ausiliarie per la messa in opera è illustrata in Figura 9.

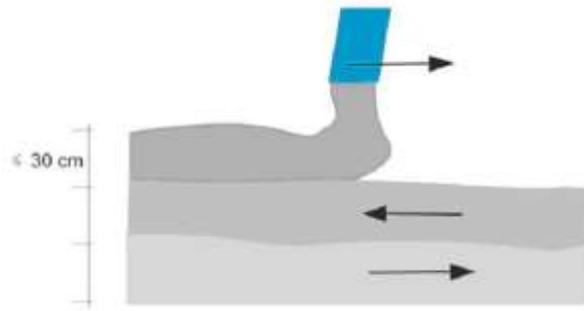


Figura 8: Disposizione e spessore dello strato nel corso della messa in opera.

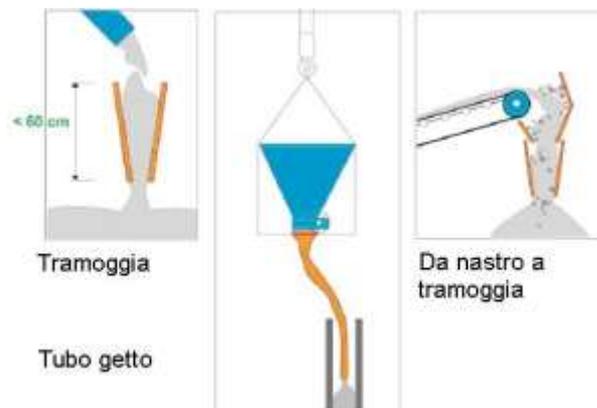


Figura 9: Attrezzature per la messa in opera del calcestruzzo.

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 10.

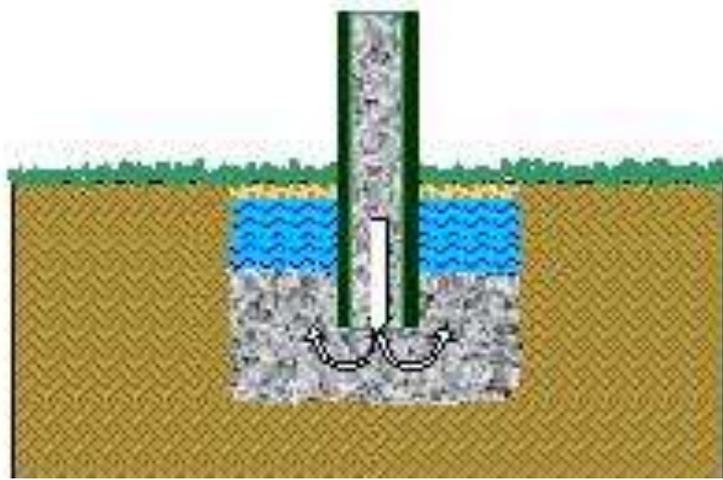


Figura 10: Getto di calcestruzzo in presenza di acqua.

Il calcestruzzo autocompattante deve essere gettato 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 sulle superfici dei paramenti in calcestruzzo. 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.

Un calcestruzzo autocompattante ha una distanza di scorrimento orizzontale che dipende anche dalla densità delle armature.

6.3.4 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 da eventuali 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 (Figura 11).

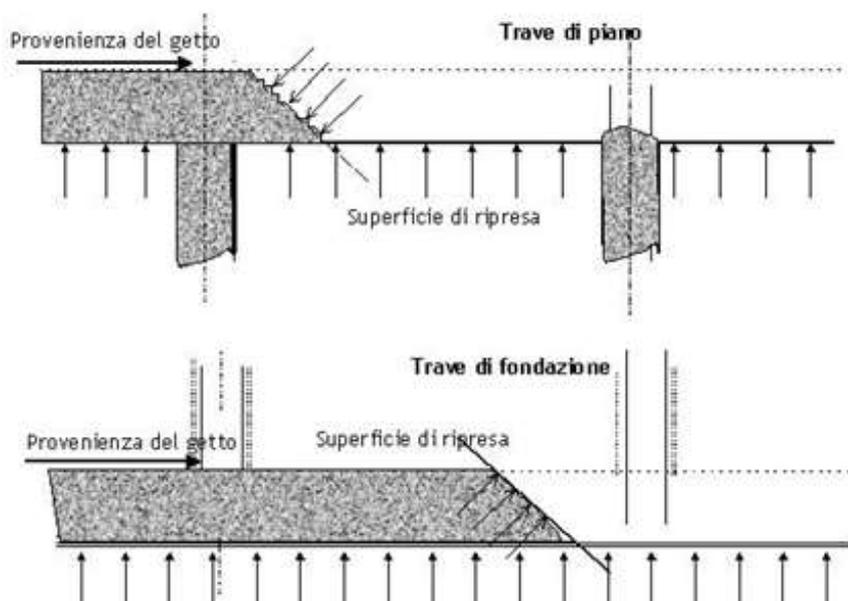


Figura 11: Ripresa di getto in travi di piano e di fondazione.

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 stato plastico così da evitare i “giunti freddi”. 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: l’interposizione di giunti *waterstop*, la continuità del getto, la prescrizione di calcestruzzi a bassa permeabilità, ed eventuali rivestimenti interni della struttura.

6.4 Compattazione del calcestruzzo

Quando il calcestruzzo fresco è gettato nella cassaforma, contiene molti vuoti e tasche d’aria. Il volume di tale aria, che si aggira generalmente tra il 5 ed il 20 %, dipende dalla classe di consistenza del calcestruzzo, dalla conformazione della cassaforma, dalla sua rigidità, dal tipo di rivestimento della stessa cassaforma, dalla sua collocazione, dalla distribuzione e dall’addensamento delle barre d’armatura e dal modo con cui il calcestruzzo è stato gettato nella cassaforma (Figura 12).

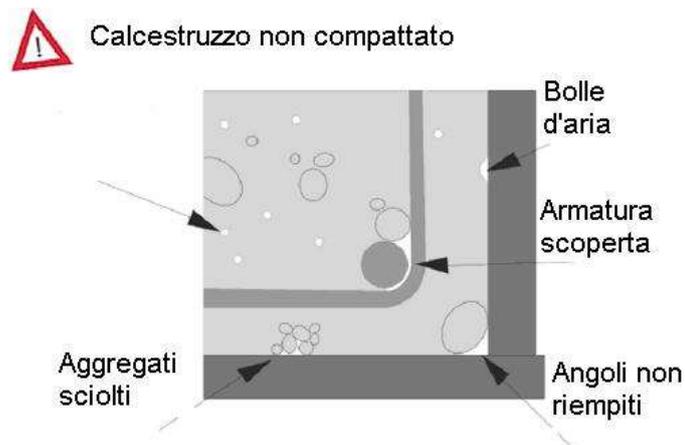


Figura 12: Difettosità interne del calcestruzzo non compattato dovute a vuoti e tasche d'aria.

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.

La determinazione della appropriata metodologia di compattazione deve essere contestualizzata ad ogni specifico calcestruzzo, prestando particolare attenzione alla singola fase di getto, all'esecuzione dei singoli elementi costruttivi che costituiscono le opere, alle condizioni ambientali. L'appropriata metodologia di compattazione deve essere prescritta dalle specifiche tecniche progettuali e delle modalità di esecuzione delle strutture e dal Capitolato tecnico.

L'impresa esecutrice deve produrre il documento tecnico (relazione tecnica ed elaborati tecnici) relativo alla compattazione del calcestruzzo, in cui devono essere indicate le procedure e le modalità operative in relazione alle metodologie di compattazione del calcestruzzo, per gli elementi costruttivi che costituiscono le opere da realizzare. L'impresa esecutrice deve sottoporre preventivamente con dovuto anticipo all'approvazione scritta del Direttore dei Lavori, il documento sopra indicato, fermo restando la responsabilità ultima dell'impresa esecutrice per la compattazione del calcestruzzo. Il Direttore dei Lavori, contemporaneamente al procedere dei cicli delle operazioni del getto del calcestruzzo deve accertarsi e verificare che l'impresa esecutrice effettui confacenti procedure e modalità operative di compattazione del calcestruzzo, come indicate nel documento tecnico relativo alla compattazione del calcestruzzo, approvato dal Direttore Lavori; come prescritto dalle specifiche tecniche e del capitolato tecnico

I calcestruzzi con classi di consistenza S1, S2 e S3 richiedono una compattazione più energica dei calcestruzzi di classe S4 o S5.

La lavorabilità di un calcestruzzo consegnato nella corretta consistenza richiesta dal cliente non può essere aumentata aggiungendo acqua. Tale aggiunta penalizza la resistenza e la durabilità, dando luogo alla formazione di una miscela instabile che tende a segregare durante la messa in opera.

In generale, all'atto della consegna, non sono ammesse manipolazioni del calcestruzzo attraverso aggiunte di componenti da parte dell'impresa esecutrice. Le aggiunte di componenti in cantiere fanno decadere sempre le garanzie del produttore se non espressamente previste durante la progettazione del calcestruzzo.

6.4.1 Compattazione mediante vibrazione

La vibrazione consiste nell'imporre al calcestruzzo fresco rapide vibrazioni che fluidificano la malta e riducono drasticamente 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 vibratori possono essere interni ed esterni.

I vibratori interni, detti anche ad immersione o ad ago, sono i più usati nei cantieri; 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 13). Quindi, la distanza tra due punti adiacenti di inserimento dell'ago di vibrazione dovrà essere: circa 30 cm, per diametri dell'ago inferiore a 40 mm; circa 40 cm, per diametri dell'ago tra 40 e 60 mm; circa 70 cm per diametri dell'ago superiori a 60 mm.

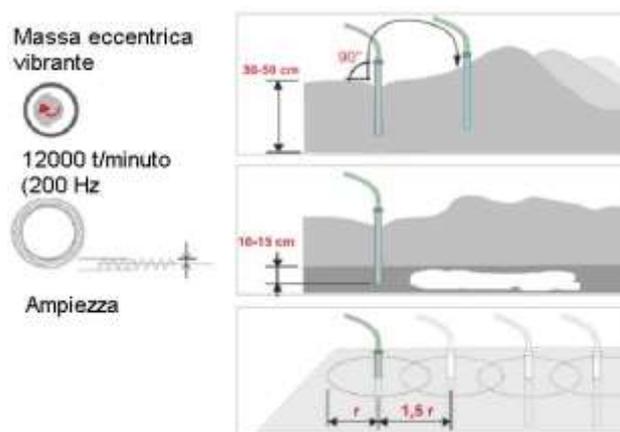


Figura 13: Caratteristiche dei vibratori interni.

Per effettuare la compattazione l'ago vibrante è introdotto verticalmente e viene 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.

Il tempo medio di permanenza del vibratore nel getto, varia sulla base della consistenza del calcestruzzo, orientativamente come segue:

- classe di consistenza V4 (mediante metodo Vebé) → 30÷50 s
- classe di abbassamento al cono S1 → 25÷30 s
- classe di abbassamento al cono S2 → 20÷25 s
- classe di abbassamento al cono S3 → 15÷20 s
- classe di abbassamento al cono S4 → 10÷15 s
- classe di abbassamento al cono S5 → 5÷10 s
- classe di spandimento F6 → 0÷5 s

I cumuli che inevitabilmente si formano quando il calcestruzzo è gettato nelle casseforme devono essere livellati inserendo il vibratore entro la loro sommità. Per evitare la segregazione, il calcestruzzo non deve essere spostato lateralmente con i vibratorii mantenuti in posizione orizzontale, operazione che comporterebbe un forte affioramento di pasta cementizia con contestuale sedimentazione degli aggregati grossi. E' opportuno, quando possibile, che il vibratore non affianchi le barre d'armatura. I vibratorii esterni sono utilizzati generalmente negli impianti di prefabbricazione; possono comunque essere utilizzati anche nei cantieri, anche in combinazione con la vibrazione interna, quando la struttura è complessa o l'addensamento delle barre d'armatura limita o impedisce l'inserimento di vibratorii interni.

I vibratorii 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'ideale 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.

Un calcestruzzo più lavorabile è meno dipendente dalla efficacia della compattazione in opera, cioè dalle competenze e prestazioni del personale addetto alla attività della compattazione del calcestruzzo in cantiere.

Gli elementi di una certa altezza, quali pilastri e pareti sono caratterizzati dalla tendenza delle bolle d'aria a raccogliersi in alto: ad ogni deposizione del singolo strato del calcestruzzo le nuove bolle, che si originano con questo, vengono inglobate da quelle provenienti dagli strati inferiori, che non sono ancora affiorate alla superficie al momento della deposizione. In questi casi la vibrazione deve essere effettuata con la stessa cura con cui è stato costipato a rifiuto il calcestruzzo dei provini per effettuare i controlli di accettazione.

6.4.2 Grado di Compattazione

Il grado di compattazione, che è funzione del tempo di vibrazione in relazione alla lavorabilità del calcestruzzo ha una notevole influenza sulla resistenza meccanica dello stesso calcestruzzo in opera.

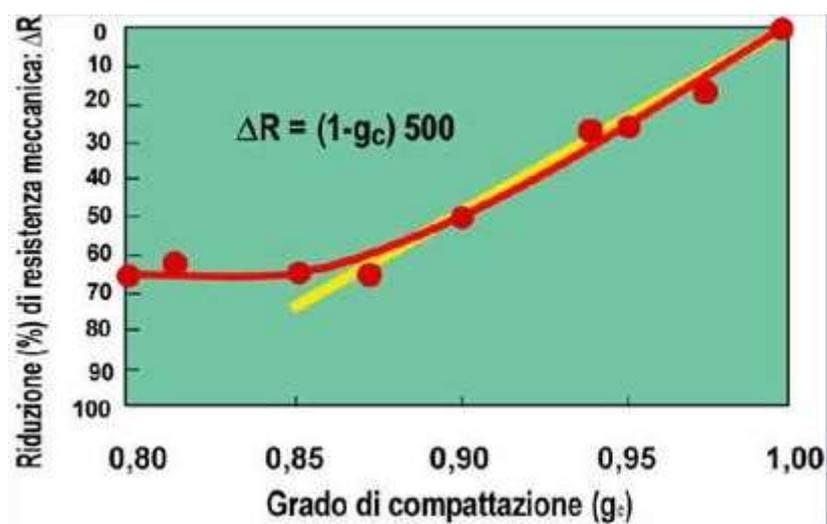


Figura 14: Influenza del grado di compattazione del calcestruzzo sulla riduzione di resistenza meccanica.

Per ogni punto centesimale del grado di compattazione in meno rispetto ad 1, ovvero la compattazione Completa, si può registrare una riduzione della resistenza meccanica nel calcestruzzo della struttura, rispetto al valore del corrispondente calcestruzzo del provino compattato a rifiuto, anche del 5%.

6.5 Calcestruzzo proiettato

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

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

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.

I criteri di classificazione e di conformità del calcestruzzo proiettato sono definiti nella norma UNI EN 14487-1 Calcestruzzo proiettato Parte 1: Definizioni, specificazioni e conformità.

La resistenza a compressione del calcestruzzo proiettato, caratterizzato da classi di resistenza comprese tra 30 e 45 MPa (UNI EN 206:2014 e UNI 11104), è valutata su provini estratti mediante carotaggio dal calcestruzzo in opera o su pannello di prova secondo UNI EN 14488-1.

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. La norma UNI EN 14488-2 Calcestruzzo proiettato: Parte 2 Esecuzione riporta le modalità operative di esecuzione.

I costituenti base per la realizzazione della miscela (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 calcestruzzo 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 stessa.

Per addensare la miscela umida fresca e accelerare lo sviluppo delle resistenze meccaniche, si possono utilizzare 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 si consiglia 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 dovrebbe essere minore di 5 ± 2 °C né maggiore di 35 ± 2 °C.

Per una corretta messa in opera del calcestruzzo proiettato, la superficie di getto deve essere opportunamente preparata effettuando:

- 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. 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 calcestruzzo 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. Considerato che a causa dell'elevato rapporto superficie/volume esiste una notevole tendenza all'essiccazione, la maturazione 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.

6.6 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 dell'ordine di alcune ore l'impasto rimane plastico, possono manifestarsi fenomeni fessurativi riconducibili:

- all'assestamento differenziale delle particelle solide che sedimentano sotto l'azione del campo gravitazionale;
- 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, peraltro fenomeno da evitare e quindi del tutto assente in buona parte dei getti.

Il ritiro plastico è tipico degli elementi strutturali piani, caratterizzati da elevati rapporti superficie/volume (lastre, solette, pavimentazioni). Non rappresenta di solito 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 individuata come:

- separazione della boiaccia dal resto dell'impasto;
- drenaggio di acqua al di fuori dell'impasto;
- conseguenza della sedimentazione dei solidi particellari, incapaci di trattenere tutta l'acqua usata per l'impasto.

Generalmente l'acqua di essudazione che si forma sulla superficie del calcestruzzo è dannosa. 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, secondo le indicazioni delle norme UNI 7122 Calcestruzzo fresco – determinazione della quantità d'acqua d'impasto essudata, ed UNI EN 12350 – 4 Prova sul calcestruzzo fresco – indice di compattabilità.

6.7 Assestamento plastico

La velocità di assestamento del calcestruzzo, dovuto ad un processo di sedimentazione, 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:

- di elementi fissi rappresentati dall'armatura orizzontale, staffe ed eventualmente dai bordi creati dai pannelli delle casseforme non perfettamente montati gli uni sugli altri;
- dalle variazioni brusche di sezione;
- dalla presenza di superfici inclinate;
- dall'interferenza dimensionale dell'aggregato grosso;
- 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 orizzontali di grande spessore, sulle superfici laterali dei pilastri in corrispondenza delle staffe e dei bordi di disallineamento in corrispondenza delle casseforme (Figure 14 e 15).

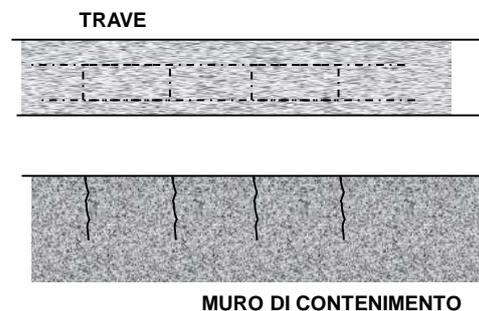


Figura 14: Fessure che seguono la direzione dei ferri sulla sommità di travi.

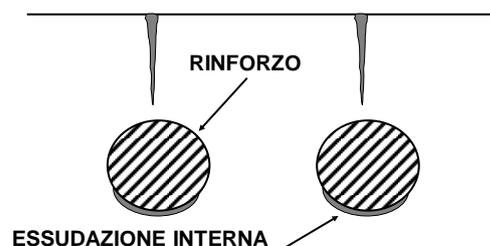


Figura 15: Essudazione interna per effetto capillare.

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 16). 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, entrambi processi di natura espansiva, è lecito ipotizzare un distacco inaspettato di gran parte del copriferro.

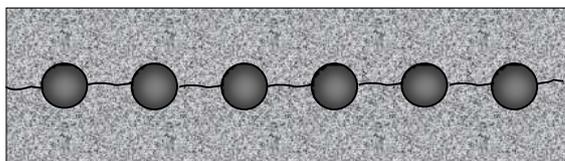


Figura 16: Fessurazione orizzontale dovuta a ferri molto ravvicinati.

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.

Nelle lastre nervate la fessurazione è provocata dall'assestamento differenziale dell'impasto della soletta e delle nervature. In una lastra nervata a spessore modesto, termina prima dell'assestamento (Figura 16).

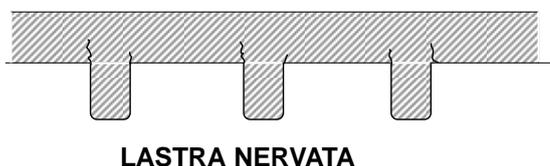


Figura 16: Nelle lastre

Nel getto di
attendere che

fferenziale della miscela.

ε 1-2 (Figura 17) e quindi

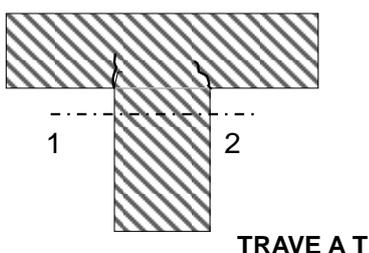


Figura 17: Ne

Nel 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 – come si vede in Figura 15 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 il rivestimento superficiale 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 pareti alte; 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 della miscela.

6.8 Ritiro plastico

Si manifesta nelle prime ore, 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 la miscela 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.

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, la miscela risulta 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.

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, non appena finita la fase di presa del calcestruzzo, adottando uno o più dei seguenti provvedimenti:

- procedere con la maturazione umida;
- 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 maturazione;
- 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 maturazione (è raccomandato l'uso di teli bagnati, di fogli di plastica o di acqua nebulizzata).

7. Maturazione e protezione del calcestruzzo

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

- evitare modifiche dell'idratazione del cemento;
- ridurre il ritiro in fase plastica e nella fase iniziale dell'indurimento (1 ÷ 7gg);
- far raggiungere un'adeguata resistenza meccanica alla struttura;
- ottenere un'adeguata impervietà, compattezza e durabilità della superficie;
- migliorare la protezione nei riguardi delle condizioni climatiche (temperatura, umidità, ventilazione) e/o danni di tipo meccanico;
- evitare vibrazioni, impatti, o danneggiamenti sia alla struttura che alla superficie, ancora in fase di indurimento.

La maturazione 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. Per consentire una corretta maturazione è necessario mantenere costantemente umida la struttura realizzata.

L'appaltatore è responsabile della corretta esecuzione della maturazione, che potrà essere tenuta sotto controllo mediante:

- la permanenza entro casseri del conglomerato (almeno 3 giorni salvo prescrizioni specifiche del calcestruzzo);
- l'applicazione, sulle superfici libere, di specifici film di protezione mediante la distribuzione nebulizzata di additivi stagionanti (agenti di curing);
- l'irrorazione continua del getto con acqua nebulizzata;
- la copertura delle superfici del getto con fogli di polietilene, sacchi di iuta o tessuto non tessuto mantenuto umido in modo che si eviti la perdita dell'acqua di idratazione;
- la creazione attorno al getto, con fogli di polietilene od altro, di un ambiente mantenuto saturo di umidità;
- la creazione, nel caso di solette e getti a sviluppo orizzontale, di un cordolo perimetrale (in sabbia od altro materiale rimovibile) che permetta di mantenere la superficie ricoperta da un costante velo d'acqua.

I prodotti filmogeni di protezione non possono essere applicati lungo i giunti di costruzione, sulle riprese di getto o sulle superfici che devono essere trattate con altri materiali.

Al fine di assicurare alla struttura un corretto sistema di maturazione in funzione delle condizioni ambientali, della geometria dell'elemento e dei tempi di disarmo e rimozione delle casseforme previsti, l'appaltatore, previa informazione alla direzione dei lavori, deve eseguire accurate verifiche di cantiere che assicurino l'efficacia delle misure di protezione adottate.

La durata della maturazione protetta dei getti deve essere garantita dai 3 ai 7 giorni consecutivi.

Si definisce "ordinaria" la maturazione del calcestruzzo che avviene a temperatura ambiente ($5\div 32^{\circ}\text{C}$) con esclusione d'ogni intervento esterno di riscaldamento o raffreddamento. Per contro, si definisce maturazione "accelerata" quella che si effettua con sistemi di maturazione ad alta temperatura e/o in particolari condizioni d'umidità e pressione. La maturazione 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 ($UR \geq 90\%$). Le miscele con un basso contenuto in acqua, possono richiedere, nel corso della maturazione, un apporto esterno d'acqua.

La sensibilità del calcestruzzo nei riguardi della maturazione può dipendere:

- 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 18 (i valori sono stati rilevati a temperatura dell'aria 21°C e velocità del vento $4,5\text{ m/s}$).

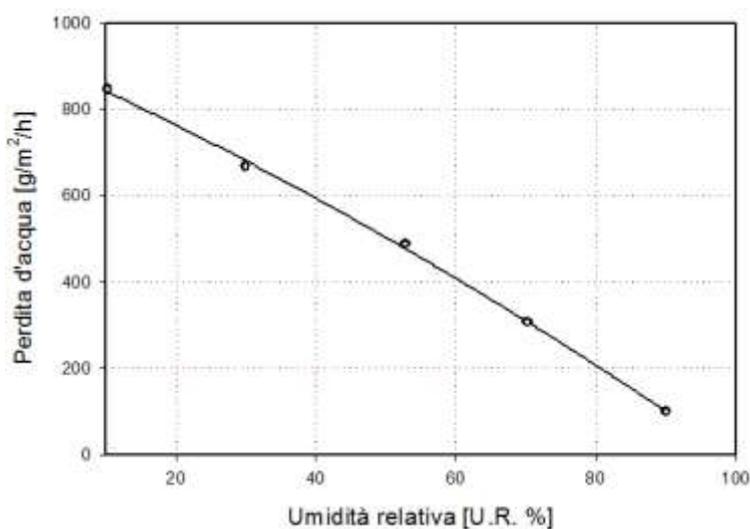


Figura 18: Perdita di acqua dalla superficie del calcestruzzo fresco per effetto dell'umidità relativa dell'ambiente (temperatura dell'aria 21°C ; velocità del vento $4,5\text{ m/s}$).

La durata della maturazione “umida” condiziona lo sviluppo delle resistenze meccaniche. In genere la resistenza dei provini esposti sempre all’aria è molto inferiore rispetto a quella degli stessi provini mantenuti in ambiente saturo d’umidità.

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 19 è rappresentato il tipico effetto della temperatura dell’aria sulla perdita d’acqua del calcestruzzo fresco, con umidità relativa dell’aria 70% e velocità del vento 4,5 m/s.

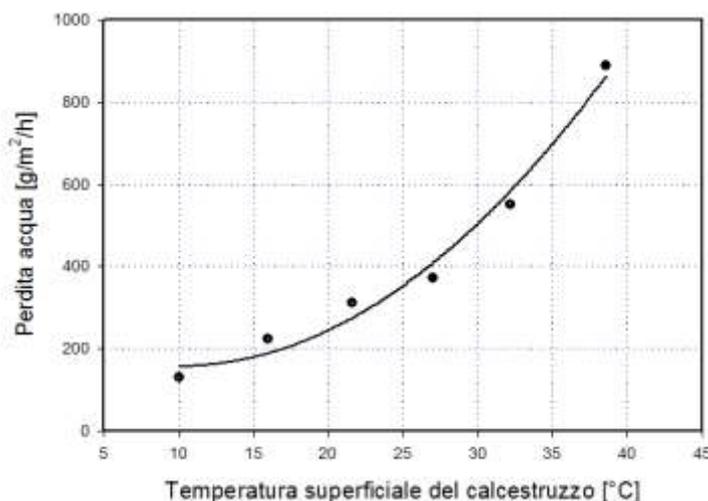


Figura 19: Perdita di acqua del calcestruzzo poco dopo il getto (umidità relativa dell’aria 70%; velocità del vento 4,5 m/s) per effetto della temperatura.

La temperatura elevata richiede una corretta maturazione umida del getto, anche se i tempi necessari per raggiungere le resistenze prescritte sono più brevi. La temperatura di maturazione 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.

La Figura 20 indica l’influenza della velocità del vento sulla perdita d’acqua dalla superficie del calcestruzzo.

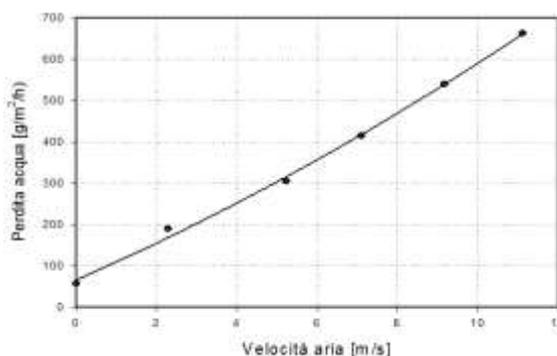


Figura 20: Perdita di acqua del calcestruzzo fresco (umidità relativa 70%; temperatura 21° C) per effetto della velocità del vento.

7.1 Condizioni di clima particolari

Le prescrizioni precedenti di fornitura, di messa in opera, di maturazione e di protezione del calcestruzzo si applicano per le condizioni ambientali correnti.

Particolari precauzioni, definite preventivamente devono essere adottate allorché la temperatura dell'aria misurata in cantiere è inferiore a 5° C (clima freddo) o quando la temperatura del calcestruzzo al momento della sua messa in opera è suscettibile di superare 32° C (clima caldo).

7.1.1 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.

Una temperatura particolarmente rigida può produrre, sulla superficie del calcestruzzo non opportunamente protetta, effetti di sfarinamento o di scagliatura. Occorre dunque adottare opportuni sistemi di protezione dei getti, che possono variare da caso a caso. Le casseforme convenzionali e/o le casseforme evolute con rivestimento in legno sono già per se stesse dei buoni isolanti, ma se si prevede un clima molto freddo, o si deve gettare una parete o una soletta sottile, può essere necessaria una coibentazione supplementare. Le casseforme con rivestimento metallico non hanno nessun potere isolante, per cui in condizioni ambientali sfavorevoli, necessitano di un adeguato isolamento. Prima del getto si deve verificare che tutte le superfici che saranno 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 dall'impresa esecutrice se la temperatura dell'aria è 0°C; tale limitazione non si applica nel caso di getti in ambiente protetto o in presenza di adeguato isolamento o qualora siano predisposti opportuni accorgimenti efficaci, approvati dalla Direzione Lavori, come ad esempio riscaldare gli ingredienti costituenti il calcestruzzo durante la miscelazione (riscaldare preferibilmente l'acqua, gli aggregati e quando è possibile l'ambiente) per prevenire i citati effetti del clima freddo. A causa del rallentamento dello sviluppo della resistenza meccanica dovuto alle basse temperature il calcestruzzo deve stagionare ad una temperatura del conglomerato cementizio sufficientemente elevata (per es. 10° C) per un tempo sufficientemente lungo (per es. 7 giorni) di maturazione parziale affinché sia eliminabile il rischio degli effetti della gelata. La temperatura del calcestruzzo deve essere mantenuta, ai fini del decorso nel tempo della resistenza meccanica e del rischio causato dalla formazione del ghiaccio, al di sopra di quella ambientale. Fra i sistemi utilizzati per mantenere la temperatura del calcestruzzo dopo il getto al di sopra di quella ambientale si evidenziano:

- prescrivere la temperatura del calcestruzzo all'arrivo in cantiere (alcuni valori di temperatura del calcestruzzo alla consegna con basse temperature dell'ambiente sono dipendenti spesso dalla possibilità di poter riscaldare i costituenti in impianto, per questo motivo per la prescrizione della temperatura va contattato preventivamente il produttore di calcestruzzo per valutarne la fattibilità)

- valutare il raffreddamento del calcestruzzo durante le fasi che costituiscono il ciclo di getto (per es. scarico dall'autobetoniera, movimentazione attraverso gru e/o pompa, nastri, ecc., riempimento della cassaforma);
- mantenere la temperatura del calcestruzzo dopo il getto a 10° C riducendo al minimo la dissipazione del calore di idratazione sviluppato
- progettare un sistema di casseri, anche riscaldati, che non permettono la dissipazione del calore verso l'ambiente esterno accoppiati con appositi sistemi di maturazione

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

Prima di disarmare e rimuovere le casseforme in condizioni climatiche fredde si dovrebbero effettuare delle verifiche per quanto riguarda la temperatura del calcestruzzo in maturazione, verificando ad esempio che non sia inferiore a 10° C, in relazione al tempo di fine presa ed alla resistenza alla compressione iniziale.

Il valore della resistenza alla compressione iniziale del calcestruzzo in condizioni climatiche fredde dovrebbe essere controllata mediante prove su cubetti stagionati, confezionati e conservati negli stessi ambienti e nelle stesse condizioni del calcestruzzo in cui è stato messo in opera e in maturazione, quindi non protetti dagli effetti del clima freddo.

Le misure protettive devono essere mantenute almeno finché il periodo pre-indurimento sia completato, così come determinato e confermato dalle prove sui cubetti.

Si può ricorrere, in fase di progettazione del mix design del calcestruzzo, alla riduzione del rapporto acqua/cemento, eventualmente compensato dall'aggiunta di agenti super-fluidificanti e all'uso di idonei additivi acceleranti, coadiuvati, ove necessario, da additivi aeranti, per conseguire la resistenza ai cicli gelo-disgelo (UNI EN 206-1). Nel caso di superfici piane il calcestruzzo deve essere protetto tramite presidi di protezione semplici preposti a trattenere, per quanto possibile, il calore prodotto dall'idratazione e preservare il calcestruzzo fresco dagli eventi atmosferici, quali il vento, la pioggia, il precipitare delle temperature ambiente o alla copertura negli altri casi, evitando in ogni caso qualunque apporto d'acqua sulla superficie.

Si evidenzia come, anche nel caso in cui le condizioni climatiche non portino ad una formazione del ghiaccio subito dopo il getto, il calcestruzzo rimanga comunque esposto al rischio della gelata per un tempo relativamente lungo, almeno fin quando non abbia raggiunto un minimo di resistenza meccanica alla compressione, pari ad almeno 5 N/mm²; in questo periodo una gelata potrebbe indurre nel conglomerato danni irreversibili.

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 dal gelo, 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 seguente Tabella 7.1 sono riportate le temperature minime da garantire per il getto del calcestruzzo nonché la massima velocità di raffreddamento consigliabile, in relazione alle dimensioni del getto.

Tabella 7.1 – Temperature e velocità di raffreddamento consigliate in relazione alle dimensioni della sezione di calcestruzzo.

Dimensione minima della sezione [mm²]			
< 300	00 ÷ 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 tollerabile 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 ambientale 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. Il calcolo della resistenza termica delle casseforme determina i valori necessari per mantenere un elemento costruttivo in calcestruzzo alla temperatura idonea (per es. 10° C) per n giorni, in funzione del dosaggio del cemento, della dimensione minima della struttura e della temperatura ambientale, fino al raggiungimento della resistenza di riferimento prescritta, sia in fase di maturazione che per il disarmo. 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.

7.1.2 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 ambientali che caratterizzano il clima caldo sono:

- temperatura ambiente elevata ($T_a = \geq 32^\circ \text{C} - \leq 45^\circ \text{C}$);
- bassa umidità relativa dell’ambiente;
- intensità e incremento velocità del vento $> 5 \text{ km/h}$;
- elevato assorbimento del calore dei raggi solari delle superfici (esposizione ai raggi solari);
- temperatura elevata ($> 30^\circ \text{C}$) del calcestruzzo al momento della sua messa in opera.
- un tasso di evaporazione che supera $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$

I potenziali problemi per il calcestruzzo fresco riguardano:

- aumento del fabbisogno d’acqua;
- veloce perdita di lavorabilità;

- 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;
- danni all'aspetto superficiale del calcestruzzo;
- riduzione delle attese in termini di resistenza e di durabilità del calcestruzzo;
- necessità di dover ricorrere alle ore notturne per le fasi di getto del calcestruzzo.

I potenziali problemi per il calcestruzzo indurito riguardano:

- riduzione della resistenza a 28 giorni e penalizzazione nello sviluppo delle resistenze a scadenze più lunghe, se non ovviato in fase di progettazione del *mix design* del calcestruzzo, sia per effetto del prematuro indurimento del calcestruzzo;
- maggior ritiro per perdita di acqua;
- probabile insorgenza di 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 dell'aspetto della superficie dovuta alle differenti velocità di idratazione;
- maggior permeabilità.

Tutti i punti sopra elencati devono essere quindi considerati in fase di progettazione della struttura e prescrizione del calcestruzzo. Si consiglia di contattare il produttore di calcestruzzo già in fase di progettazione della messa in opera e maturazione dei getti. La progettazione di nuovi calcestruzzi possono essere fatte anche in fase di realizzazione nel caso sopraggiungano nuove necessità.

In condizioni normali, durante le operazioni di getto la temperatura del calcestruzzo fresco non dovrebbe superare 30-32° C; tale limite dovrà essere convenientemente ridotto nel caso di getti di grandi dimensioni, tenendo conto della maggiore quantità di calore di idratazione prodotto. Esistono diversi metodi per raffreddare il calcestruzzo; il più semplice consiste nell'utilizzo di acqua molto fredda o di ghiaccio in sostituzione di parte dell'acqua d'impasto.

Tuttavia, l'impiego dell'acqua fredda o del ghiaccio per abbassare la temperatura del calcestruzzo nei climi caldi e ridurre la perdita di lavorabilità, non è una operazione semplice. Può essere utile, in tal caso, il ricorso agli additivi superfluidificanti, agli additivi ritardanti o agli additivi superfluidificanti di tipo ritardante che non incidono tanto sull'abbassamento della temperatura quanto sui tempi di presa e maturazione del calcestruzzo.

7.2 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 21 e 22.



Figura 21: Distribuzione della temperatura dovuta al calore di idratazione.

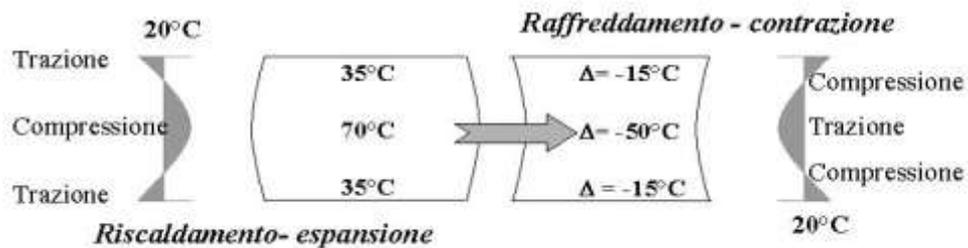


Figura 22: Effetto dei gradienti termici sullo stato di coazione di una sezione di calcestruzzo.

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 7.2 sono riportati i valori indicativi del calore d'idratazione per differenti tipi di cemento e classi di resistenza previsti dalla UNI EN 197-1.

Tabella 7.2: valori indicativi del calore d'idratazione [kJ/kg] di alcuni cementi, determinato con il metodo a soluzione.

	<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	220	240	270	300	300	330	355
28	240	275	310	335	315	355	380
90		295	365	360	340	380	400

In condizioni quasi adiabatiche la temperatura massima è raggiunta nel corso della prima settimana di maturazione (3 ÷ 7giorni). 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 ritardanti e acceleranti 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 maturazione, 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 = 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 42.5 R 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:

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

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 42.5 R (II A/L), provoca nel calcestruzzo un aumento di temperatura di $\approx 12^{\circ}\text{C}$ mentre per un cemento 32.5 R il medesimo dosaggio porta ad un incremento di $\approx 10^{\circ}\text{C}$.

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

È opportuno, inoltre, rispettare i seguenti limiti nella struttura:

- temperatura massima del calcestruzzo $\leq 70^{\circ}\text{C}$;
- $\Delta T_{\text{max}} \leq 20^{\circ}\text{C}$ fra le varie parti della struttura;
- $\Delta T_{\text{max}} \leq 15^{\circ}\text{C}$ 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. Un utile contributo può provenire dall'impiego di casseforme termoisolanti e dal ricoprimento delle superfici esposte all'ambiente, con pannelli di materiale termoisolante previa copertura con fogli di polietilene o equivalente, per tutta la durata della maturazione del getto.

Durante il progetto di strutture massive si consiglia di consultarsi con il produttore di calcestruzzo ed i fornitori dei casseri per mettere a punto prescrizioni su calcestruzzo, sistema di cassetta e maturazione, tali da limitare i ΔT fra l'interno e l'esterno del manufatto al di sotto valori dei valori che possono provocare fessure da shock termico.

7.3 Protezione termica durante la maturazione del calcestruzzo fresco

A titolo esemplificativo, richiamando peraltro quanto già evidenziato nel paragrafo relativo ai fenomeni di fessurazione e ritiro del calcestruzzo, che richiedono analoghi sistemi di protezione, sono descritti di seguito i più comuni sistemi di protezione termica adottabili nei getti di cantiere:

Cassaforma coibentata

Il $\Delta T 20^{\circ}\text{C}$ può essere rispettato se si usa una cassaforma con rivestimento isolante, es.: pannello multistrato di legno compensato con spessore non inferiore a 2 cm, o se il getto si trova contro terra.

Sabbia e foglio di polietilene

La parte superiore del getto di solette e dei getti a sviluppo orizzontale 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 maturazione di solette e getti a sviluppo orizzontale è assicurata mantenendo costantemente umidi gli stessi elementi costruttivi. 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, i teli flessibili possono essere facilmente danneggiati. Al fine di assicurare alla struttura un corretto sistema di maturazione in funzione delle condizioni ambientali, della geometria dell'elemento costruttivo strutturale e dei tempi previsti di disarmo e rimozione delle casseforme, occorre prevedere ed eseguire in cantiere una serie di verifiche che assicurino l'efficacia delle misure di protezione adottate.

Geotessuti o tessuto/non tessuto

Ricoprimento della superficie del calcestruzzo fresco esposta in quanto non a contatto della cassaforma con geotessile o tessuto non tessuto, tenuto costantemente umido. Il metodo può essere adottato in presenza di elevate temperature ambientali «calde», salvo i necessari adeguamenti, nel caso di strutture orizzontali (bidimensionali) quali solette ecc che in presenza di strutture verticali (tridimensionali) quali i pilastri, le pareti ecc.

Protezione con pannelli coibenti e/o coperte per l'isolamento termico

Protezione delle superfici del calcestruzzo fresco a contatto della cassaforma e non con pannelli termoisolanti di polistirolo espanso estruso di spessore pari a 50 mm (o con materassini di equivalente resistenza termica). Sulle superfici esposte in quanto non a contatto della cassaforma prima della predisposizione dei materassini termoisolanti coprire la superficie del calcestruzzo fresco con un foglio di polietilene. Sono presidi di protezione preposti a trattenere il calore prodotto dall'idratazione e preservare il calcestruzzo fresco dagli eventi atmosferici, quali il vento, la pioggia, il precipitare delle temperature ambientali «fredde».

7.4 Disarmo

Prima che le casseforme possano essere rimosse, il calcestruzzo deve aver raggiunto una resistenza sufficiente ad auto-portarsi ed a resistere ad eventuali danni meccanici durante il disarmo delle stesse casseforme, ovvero:

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

Le procedure operative e le modalità di disarmo delle casseforme e/o della rimozione delle unità di puntellamento, impalcature di sostegno e centine ecc. devono essere oggetto di un'apposita nota progettuale, redatta dal progettista strutturale dell'opera, riportata nelle specifiche progettuali e delle specifiche tecniche del capitolato.

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

I carichi sopportati da ogni unità di puntellamento, centine ed impalcature di sostegno, devono essere rilasciati gradatamente, in modo tale che gli elementi di supporto contigui non siano sottoposti a sollecitazioni brusche ed eccessive ed all'insorgere di azioni dinamiche.

È bene, in genere, procedere alla rimozione delle casseforme dai getti solo quando la maturazione del calcestruzzo (Si veda Appendice informativa UNI EN 13670-2010 punto F8.5 richiamata dal D.M. Infrastrutture 14 gennaio 2008 punto 4.1.7.) , sia sufficiente per la realizzazione dei cicli successivi di getto ed abbia raggiunto la resistenza indicata dal progettista per evitare fenomeni fessurativi dovuti anche a ritiro impedito e così pure in funzione della struttura da realizzare, delle procedure e modalità costruttive (es. ancoraggi e dispositivi di sospensione delle casseforme a ripresa)

Per i solai, le travi e gli impalcati è talvolta possibile procedere al disarmo parziale anticipato delle casseforme tenendo conto delle condizioni come sopra già indicate e mantenendo in esercizio le impalcature di sostegno, puntellamenti e/o attrezzature provvisorie di supporto delle casseforme, successivamente al disarmo parziale anticipato delle stesse casseforme, per un periodo definito dal progettista strutturale dell'opera, in relazione alle condizioni che influenzano la maturazione del calcestruzzo

Il disarmo deve essere autorizzato e concordato con la Direzione Lavori che deve attenersi alle indicazioni previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti e alle condizioni ambientali.

In presenza di alte temperature, nei periodi caldi, è talvolta possibile disarmare le casseforme verticali dopo 16, 24 o 36 ore dalla fine getto.

Questi tempi di disarmo così rapidi richiedono che la stagionatura sia assicurata da accorgimenti concretamente efficaci, al fine di evitare danni irreparabili, quali ad esempio micro e macrofessurazioni e creep degli elementi strutturali che possono recare grave pregiudizio per la stabilità e la durabilità delle opere.

Analoga attenzione si deve porre nei periodi freddi, quando le condizioni climatiche rallentano lo sviluppo delle resistenze del calcestruzzo, in particolar modo nel disarmo e rimozione delle casseforme a ripresa e/o delle casseforme e delle relative strutture di sostegno delle solette e delle travi.

In caso di dubbio, è sempre opportuno:

- rilevare in situ i valori della temperatura del calcestruzzo in opera durante il processo di maturazione correlata con il grado di maturazione del calcestruzzo in tempo reale mediante dispositivi di controllo che possono fornire un'indicazione affidabile per la stima della resistenza del calcestruzzo
- verificare la resistenza meccanica reale del calcestruzzo, prima di procedere alla rimozione delle casseforme avendo cura, nella fase di getto, di prelevare un numero di campioni sufficiente per effettuare i controlli ufficiali di accettazione a 28 giorni, ma anche verifiche dopo 16, 24, 36 ore e/o da 2 a 7 giorni dal getto.

I provini di calcestruzzo prelevati per le verifiche della resistenza meccanica a compressione iniziali del calcestruzzo, dopo 16, 24, 36 ore e/o da 2 a 7 giorni dal getto, devono essere conservati negli stessi luoghi e nelle stesse condizioni ambientali in cui è stato messo in opera.

Il grado di compattazione del calcestruzzo messo in opera, non sempre sufficiente, condiziona lo sviluppo della resistenza a compressione nei primi giorni dal getto. Per tale motivo, prima di procedere al disarmo ed alla rimozione delle casseforme, nel quantificare la resistenza meccanica dopo 16, 24, 36 ore e/o n giorni (inferiore a sette giorni) dalla fine del ciclo del getto del

calcestruzzo, può essere utile applicare, ai valori rilevati, un coefficiente di riduzione K variabile fra il 10% ed il 15%.

8. Prescrizioni relative all'esecuzione di pavimentazioni in calcestruzzo

Un utile riferimento è il documento CNR Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo ROMA – CNR 16 ottobre 2014

8.1 Pianificazione delle operazioni

È consigliabile effettuare sempre un controllo generale del cantiere prima dell'inizio dei lavori, per verificare da un lato il rispetto delle norme di sicurezza, dall'altro l'assenza di situazioni che possano pregiudicare la buona esecuzione della pavimentazione o ridurre la sua durabilità. In particolare, il controllo generale deve insistere sulle condizioni del sottofondo della pavimentazione, sulle condizioni ambientali e sulla documentazione relativa al cantiere.

Successivamente, in fase di getto, è obbligo del Direttore Lavori effettuare i controlli di accettazione dei materiali utilizzati, previsti dalle normative vigenti, vigilando anche sull'esecuzione dei lavori (condizioni ambientali, particolari esecutivi, tempistiche, stagionatura).

La necessaria attenzione deve essere posta nel verificare la corretta attuazione delle norme antinfortunistiche, con particolare riguardo ai collegamenti elettrici, ai carichi sospesi, alle caditoie e chiusini sporgenti o di pericolosa dimensione, secondo quanto previsto dalla legislazione vigente. Buche e fosse devono essere opportunamente segnalate e protette, il percorso dei mezzi deve essere indicato e opportunamente delimitato.

8.2 Condizioni ambientali

Si deve assicurare l'esistenza di adeguate protezioni degli ambienti contro condizioni climatiche avverse (vento, sole, pioggia, gelo) durante le fasi di getto, di lavorazione di indurimento e di maturazione. Prima del getto è opportuno verificare le previsioni meteo della zona.

8.3 Documentazione tecnico/contrattuale

Dovrebbe essere accertata e annotata la presenza o meno del contratto con l'impresa esecutrice, del progetto esecutivo, del piano di sicurezza.

Il progetto esecutivo dovrebbero contenere, in particolare, i seguenti documenti redatti in forma esaustiva:

- relazione tecnica illustrativa;
- relazione geotecnica inclusiva dei risultati delle prove preliminari;
- relazione sulla qualità dei materiali;
- relazione di calcolo;
- specifiche tecniche (capitolato tecnico);
- specifiche sulle modalità di getto;
- specifiche sulle modalità di stagionatura e protezione del getto durante la fase esecutiva;
- piano di manutenzione;
- elaborati grafici in opportuna scala (planimetrie e sezioni quotate, particolari, fasi costruttive, ecc.).

8.4 Preparazione e tolleranze nella massicciata

Prima del getto della piastra di calcestruzzo dovrà essere effettuato un controllo del supporto, al fine di:

- verificare la planarità con tolleranze ± 1 cm rispetto al valore prescritto dal Progettista che,

- in assenza di specifiche, può essere assunto pari a 2 cm su una stadia di 4 metri;
- eseguire un controllo generale per determinare eventuali zone difformi dal livello minimo previsto per la pavimentazione;
- verificare l'assenza di avvallamenti e di ristagni d'acqua;
- verificare l'assenza di ghiaccio;
- rilevare eventuali possibili riduzioni di quota dovute a detriti, tubi o quant'altro riduca lo spessore della pavimentazione;
- individuare la presenza di cunicoli, fondazioni, plinti, travi che riducano lo spessore della piastra e che comunque rappresentino punti a rischio di fessurazioni indotte da differenziata rigidità del supporto;
- costipare tutti gli scavi ed i rinterri fino a rifiuto, utilizzando strumenti e macchine idonee alle condizioni di cantiere e alle caratteristiche del materiale di riempimento. I rinterri nelle vicinanze di pilastri, basamenti, cunicoli, canaline, muri, scavi per impiantistica, ecc., vanno realizzati con particolare attenzione essendo questi i punti più soggetti a cedimenti;
- verificare che chiusini, soglie, angolari, ecc., siano murati a sezione verticale; verificare i piani con il controllo delle quote degli elementi di raccordo (chiusini, soglie angolari, guide, ecc.) che dovranno rientrare nella tolleranza di orizzontalità riferita alla quota di riferimento prefissata nel progetto. Nel caso siano previste, in fase progettuale, delle pendenze, verificare che le quote di posa dei vari elementi predisposti siano congrue e coordinate. La presenza di pendenze non deve inficiare lo spessore minimo della piastra, previsto in fase progettuale;
- rimuovere sassi di grosse dimensioni, macerie e materiali leggeri eventualmente presenti.

Nel caso che il transito delle autobetoniere lasci tracce profonde nella massicciata, è opportuno sospendere i lavori e ripristinare la massicciata in modo che rispetti le tolleranze di progetto.

8.5 Fasi operative dell'esecuzione

È compito della Direzione Lavori verificare il progetto esecutivo e la rispondenza dell'esecuzione con quanto stabilito nel progetto, con particolare riferimento alla qualità dei materiali e alla esecuzione dei lavori.

Le fasi operative in cui si articola la posa della pavimentazione industriale debbono essere descritte nel progetto esecutivo. Esse sono di seguito cronologicamente riassunte:

- isolamento delle strutture verticali;
- posizionamento della barriera al vapore e/o dello strato di scorrimento;
- posa dell'armatura;
- fornitura e posa in opera del calcestruzzo;
- applicazione e lavorazione dello strato di usura;
- protezione del getto e stagionatura protetta;
- esecuzione dei giunti di contrazione (ove previsti);
- riempimenti e sigillature dei giunti;
- messa in esercizio della pavimentazione.

8.5.1 Isolamento strutture verticali e spiccati verticali

Tutte le strutture verticali a contatto con la pavimentazione (bicchieri di plinti, fondazioni, basamenti, pilastri, muri, strutture prefabbricate di tamponamento, ecc.) necessitano di opportuno isolamento per garantire la massima indipendenza di comportamento della pavimentazione (gli

spostamenti relativi in direzione verticale e orizzontale non devono essere limitati da altri elementi strutturali).

Il materiale (col relativo spessore) deve aderire perfettamente alla parete della struttura verticale. L'altezza dell'isolamento deve essere superiore allo spessore del getto e interessare tutta la sezione dello stesso.

8.5.2 Barriera vapore/scorrimento

Durante la posa si devono adottare gli opportuni accorgimenti per non danneggiare la barriera al vapore o lo strato di scorrimento.

Nel caso di strato di sabbia, accertarsi che sia ben compattato e livellato. Nel caso di impiego di fogli di polietilene o tessuto non tessuto, accertarsi che i sormonti siano adeguati (non inferiori a 15 cm) senza grinze evidenti e posizionati in relazione alla prevista direzione del getto. Nel caso debba essere realizzato uno strato di separazione con permeabilità scarsa o nulla, si deve tenere presente che in tal modo vengono accentuati i fenomeni di bleeding e di ritiro differenziale che possono facilitare possibili fessurazioni e l'imbarcamento delle lastre sui bordi. È possibile ridurre in modo significativo tale deformazione adottando degli specifici accorgimenti, come, per esempio, la posa sopra il manto impermeabile di uno strato di sabbia di 5-10 cm che, assorbendo parte dell'acqua d'impasto del calcestruzzo, permetterà di ottenere un limitato differenziale di evaporazione dell'acqua tra l'estradosso e l'intradosso della piastra di calcestruzzo.

8.5.3 Posa armatura (reti, fibre, barrotti)

La posa dell'armatura deve essere effettuata secondo le prescrizioni di progetto. Il ricoprimento dell'armatura all'estradosso deve essere di almeno 4 cm, e comunque superiore alla profondità del taglio dei giunti di contrazione. Nel caso in cui l'armatura posizionata nella parte alta del getto debba consentire il calpestio degli operatori, il suo diametro non potrà essere minore di 8 mm e dovrà essere appoggiata su opportuni distanziatori. Le sovrapposizioni dei pannelli di rete elettrosaldata o delle singole barre di acciaio dovranno rispettare le prescrizioni progettuali. Si dovrà prestare la cura necessaria nel dare continuità alla rete elettrosaldata, utilizzando opportuni fogli di sovrapposizione o affiancare i singoli pannelli di rete effettuando le sovrapposizioni con barre singole. Tutto ciò al fine di evitare sovrapposizioni che creino stratificazioni di rete con elevato spessore. L'esatta posizione dell'armatura nella piastra può essere ottenuta esclusivamente mediante l'utilizzo di appositi distanziatori che dovranno essere indicati in fase progettuale. L'eventuale collegamento di messa a terra dell'armatura e l'armatura suppletiva, costituita da barrotti o ferri di rinforzo attorno a chiusini e pilastri, devono essere previsti in fase progettuale.

Nel caso di aggiunta di fibre all'impasto di calcestruzzo, la quantità e le modalità di distribuzione nell'impasto dovranno consentire una uniforme dispersione delle stesse evitando inoltre la formazione di grumi.

Nei giunti di costruzione verranno predisposti idonei sistemi di ripartizione dei carichi (incastrati, barrotti, piastre, ecc.) che dovranno essere previsti, in fase di progetto, per tipologia, dimensione, distribuzione, in relazione alle sollecitazioni previste.

8.5.4 Fornitura del calcestruzzo a piè d'opera

È consentita la fornitura a piè d'opera del calcestruzzo esclusivamente con mezzi o sistemi adeguati alla quantità necessaria al getto e, soprattutto, tali da non favorire la segregazione ed influenzare negativamente l'omogeneità degli impasti. La fornitura a piè d'opera del calcestruzzo, nella quantità e nei tempi concordati, deve avvenire in modo uniforme, continuo e costante, al fine di evitare

ripresе di getto o interferire negativamente nelle operazioni di finitura. In condizioni ordinarie il tempo di attesa tra le diverse autobetoniere non dovrebbe superare i 30 minuti.

Tempi di trasporto superiori ad un ora e mezza possono essere accettati solo se preventivamente concordati con il produttore di calcestruzzo ed in relazione alle caratteristiche del calcestruzzo e alle condizioni termoigrometriche.

Si raccomanda, per una buona esecuzione della pavimentazione, che tutti gli operatori coinvolti (Direzione Lavori, Fornitore ed Esecutore) concordino preventivamente le quantità dei materiali occorrenti, frequenza di consegna, le caratteristiche reologiche del calcestruzzo ed i relativi tempi di frattazzabilità, affinché il medesimo consenta, dopo la stesura, le successive fasi di lavorazione nei tempi di normale attività delle maestranze presenti.

8.5.5 Sequenza campiture di posa

Al fine di ottimizzare le operazioni di messa in opera del calcestruzzo è opportuno che, prima dell'inizio della fase di getto, venga stabilita una sequenza di esecuzione delle campiture di posa; ciò allo scopo di limitare le interazioni, durante le varie fasi operative, tra movimentazione dei mezzi, operatori, posa di materiali allo stato fresco rispetto a zone con lavorazioni di altra natura in fase di esecuzione su zone già indurite.

8.5.6 Posa in opera calcestruzzo

La posa deve avvenire in presenza di adeguate protezioni contro condizioni climatiche avverse. Il calcestruzzo può essere livellato con staggiatura semplice manuale, con vibro-staggiatura manuale o con sistema di vibro-stesura automatizzata. In corrispondenza dei giunti di costruzione, e comunque sempre contro cassero, deve essere curata la costipazione del calcestruzzo al fine di limitare la formazione di macrocavità o nidi di ghiaia che facilmente si formano in tale posizione. Se non previsto in fase progettuale in maniera diversa, l'accostamento dei getti deve essere effettuato a tutta sezione verticale.

8.5.7 Applicazione strato di usura

Le operazioni di applicazione e lavorazione dello strato di usura devono essere eseguite su calcestruzzo fresco, prima che sia completato il fenomeno della presa. È opportuno utilizzare esclusivamente prodotti premiscelati dove sia accertata la provenienza, la classificazione, le caratteristiche prestazionali, l'eventuale marcatura CE. Fra i vari metodi di realizzazione dello strato di usura si evidenziano:

Metodo a spolvero

Il prodotto deve essere applicato anidro con spolveratura su calcestruzzo fresco e steso in almeno due fasi alternate da lavorazione meccanica, in quantità complessiva non minore di 2 kg/m². Per la finitura del manto d'usura si deve limitare al minimo indispensabile la quantità d'acqua eventualmente aggiunta. Tale metodo non è applicabile quando si utilizzano calcestruzzi areati (XF3 e XF4).

Metodo a pastina

Prima dell'applicazione della malta di riporto (o pastina) deve essere eliminato ogni deposito residuo portato in superficie dall'acqua di affioramento del calcestruzzo. Deve essere applicata una quantità di prodotto premiscelato anidro indicativamente non minore di 10 kg/m² (pastina rasata) o 15 kg/m² (pastina), se a base di aggregati lapidei, oppure 30 kg/m², se a base di aggregati metallici. Tale metodo non è applicabile quando si utilizzano calcestruzzi areati (XF3 e XF4). Per la finitura

del manto d'usura si deve limitare al minimo indispensabile la quantità d'acqua eventualmente aggiunta.

Metodo a riporto

Posa di miscela indurente a forte spessore (10-30 mm) applicata sul calcestruzzo precedentemente indurito e stagionato. La superficie del calcestruzzo deve essere finita in modo che presenti una forte rugosità superficiale e, ad avvenuta stagionatura, deve essere preparata con estrema cura allo scopo di ottenere la massima adesione della miscela al supporto. L'aderenza del sistema riportato al supporto può essere ottenuta mediante l'applicazione di un *primer* a base cementizia, resinosa o mista. Sul *primer* ancora fresco viene applicato il materiale di riporto in uno strato unico.

Metodo senza indurente superficiale riportato

È possibile eseguire la finitura della pavimentazione senza applicare sulla parte superficiale un prodotto cementizio indurente nella fase finale della lavorazione; in questo caso la finitura viene eseguita solo con un adeguato sistema di densificazione e lisciatura della parte superiore del calcestruzzo, curando particolarmente la chiusura e la successiva stagionatura.

In alcuni casi, ad avvenuto indurimento, si può procedere ad eseguire una levigatura superficiale mediante utensili diamantati; tale lavorazione permette di ottenere una superficie finale chiusa e planare, lasciando a vista la grana della miscela di calcestruzzo. Allo scopo di ottenere un miglioramento delle caratteristiche superficiali della pavimentazione, è suggerita l'applicazione di un prodotto impregnante a forte azione indurente, dando alla parte superiore della pavimentazione una resistenza meccanica migliore.

8.6 Protezione e stagionatura

Per raggiungere le potenziali prestazioni attese dal calcestruzzo, soprattutto nella zona corticale, occorre proteggerlo e stagionarlo accuratamente. La stagionatura e protezione della pavimentazione deve iniziare appena possibile, dopo la fase di lisciatura, con frattazzatrice meccanica.

La protezione è volta a prevenire gli effetti derivanti da:

- esposizione, anche durante il getto e la lavorazione, a condizioni climatiche avverse nonché all'irraggiamento solare, vento e ad aria radente, con la conseguente evaporazione repentina di acqua dalla superficie e formazione di fessure da ritiro o di debolezza meccanica superficiale o sfarinamenti;
- dilavamento per pioggia o ruscellamento dell'acqua;
- rapido raffreddamento durante i primi giorni dal getto;
- elevati gradienti di temperatura tra il centro e la superficie della pavimentazione;
- congelamento.

Fra i principali sistemi di protezione per la stagionatura della pavimentazione, utilizzabili singolarmente o in combinazione fra loro, si elencano:

- coprire la pavimentazione con teli di polietilene o con fogli e/o pannelli coibenti nel caso di basse temperature;
- rivestire con teli umidi (geotessuto mantenuto costantemente umido);
- nebulizzare acqua sulla superficie in maniera uniforme ed ininterrotta;
- applicare prodotti stagionanti che formano pellicole protettive. A tal proposito si consiglia di utilizzare prodotti che siano caratterizzati da indici di efficienza adeguati rispetto alle condizioni termo-igrometriche presenti, tenendo presente anche il problema dell'aderenza di eventuali sovrapposizioni previste o future di rivestimenti resinosi.

Fattori importanti nei processi di protezione e stagionatura sono:

- Tipo/classe di cemento;
- Rapporto acqua/cemento;
- Condizioni termo-igrometriche e di ventilazione.

L'obbligo della stagionatura deve essere prescritto dal Progettista. I metodi e la durata della stagionatura devono essere prescritti in relazione alle condizioni ambientali e operative al momento della realizzazione. La stagionatura deve essere protratta preferibilmente per circa 15 giorni e comunque in ogni caso per un tempo non inferiore a 7 giorni.

Alcuni tipi di stagionatura possono modificare l'aspetto della pavimentazione lasciando alcune differenze cromatiche superficiali. Generalmente tali differenze tendono a diminuire nel tempo. Se rappresentano un requisito essenziale, dovranno essere dettagliatamente specificate in fase progettuale.

In caso di pericolo di gelo dovranno essere poste in atto protezioni specifiche che isolino la superficie del getto dalla possibile formazione di ghiaccio negli strati superficiali durante la fase iniziale dell'indurimento.

8.7 Giunti

La disposizione dei giunti, in genere stabilita dal Progettista, è determinata dal tipo di supporto della pavimentazione, dalla conformazione delle superfici, dal lay-out eventuale, dalla presenza di interruzioni ed irregolarità (pozzetti, griglie, basamenti), dallo spessore della piastra, dal ritiro del calcestruzzo e dalla sua armatura.

Il taglio meccanico del giunto di contrazione può causare piccoli sbrecciamenti localizzati. Gli accorgimenti adottati per proteggere la stagionatura, dopo il taglio, devono essere ripristinati. Se non previsto diversamente in fase progettuale, l'accostamento dei getti separati da un giunto di costruzione deve essere rettilineo e a tutta sezione verticale. Il taglio meccanico, se previsto, viene effettuato con il solo scopo di realizzare una traccia per l'inserimento dei materiali di riempimento. La necessità di esecuzione, i tempi e la profondità di questo taglio sono pertanto del tutto ininfluenti rispetto alle caratteristiche prestazionali del giunto. L'interruzione della piastra di calcestruzzo, in tali punti, comporta che le sollecitazioni nelle zone limitrofe possano assumere valori particolarmente elevati. Per tali giunti, rappresentando quindi la parte della pavimentazione più soggetta a prematuri deterioramenti, si deve prevedere, in fase progettuale, un opportuno rinforzo della parte superficiale, in fase di posa o a stagionatura avvenuta.

Tra le lastre che formano i giunti di costruzione e di dilatazione deve essere inserito un materiale comprimibile il cui spessore possa consentire l'allungamento delle stesse senza che vengano a contatto diretto tra loro.

In condizioni ambientali particolarmente sfavorevoli, al fine di prevenire il rischio di fessurazione, è possibile anticipare l'esecuzione dei giunti, anche se questa potrebbe comportare la formazione di leggeri sbrecciamenti del bordo del taglio.

Appena realizzato, il giunto va protetto con un "profilo preformato", che potrà essere successivamente rimosso per l'eventuale sigillatura.

8.7.1 Riempimenti e sigillature

I giunti delle pavimentazioni sono generalmente chiusi mediante riempimenti eseguiti con materiali preformati o indurenti; nel caso venga richiesta una sigillatura questa dovrà essere prescritta in fase progettuale tenendo presente anche i tempi di esecuzione delle operazioni in relazione alle previste

deformazioni delle lastre. Le funzioni di riempimento e/o di sigillatura, a seconda delle prestazioni richieste alla pavimentazione, possono presentarsi congiunte o disgiunte.

I riempimenti hanno la funzione di colmare le cavità formatesi a seguito del taglio dei giunti; particolari accorgimenti consentono anche di migliorare la resistenza dello spigolo del giunto nei confronti dello sbrecciamento da urti. Per garantire nel tempo tali funzioni si richiede al materiale di riempimento un buon ancoraggio alle pareti del giunto e la capacità di sostenere i movimenti reciproci delle superfici affiancate. Sono consentiti distacchi parziali del materiale dalle pareti purché non comportino la caduta o la fuoruscita del riempimento. È opportuno posizionare elementi preformati comprimibili a cellule chiuse tra le due superfici del giunto per ottenere la sezione idonea a garantire al riempimento la sua capacità di lavoro; ciò previene anche l'eventuale adesione del ricoprimento al fondo del taglio.

Come riempimento temporaneo, ove non specificato in fase progettuale, si possono utilizzare semplici profili morbidi in PVC o simili, semplicemente inseriti a pressione. La sigillatura deve permettere la tenuta del giunto al passaggio di liquidi. Il materiale costituente la sigillatura deve possedere adeguata resistenza chimica nei confronti dei liquidi con i quali verrà a contatto ed essere in grado di sostenere, senza lacerarsi e senza distaccarsi dal supporto, i movimenti previsti per il giunto. Inoltre, il materiale deve avere caratteristiche meccaniche tali da rimanere integro ed aderente, alle temperature di esercizio previste, anche in presenza di grandi deformazioni. In ogni caso, le specifiche di realizzazione e del materiale da impiegare devono essere prescritte dal Progettista.

La sede del giunto deve avere larghezza tale da ridurre l'allungamento specifico del materiale sigillante. Si tenga però presente che giunti larghi sigillati con materiale deformabile tendono a sbrecciarsi più rapidamente, soprattutto se transitati da carichi concentrati elevati (esempio ruote piccole e dure).

Data la sollecitazione di natura fisico-meccanico del giunto posto all'estradosso della lastra di calcestruzzo, si possono prevedere distacchi o degradi localizzati che dovranno essere oggetto di specifico programma di manutenzione.

In ogni caso, il sistema sigillante non potrà sostituire una corretta impermeabilizzazione della pavimentazione.

8.8 Tipo finitura

Il tipo di finitura di una pavimentazione industriale è in relazione alla sua destinazione d'uso e alla richiesta prestazionale o estetica richiesta.

In linea di massima la finitura di una pavimentazione industriale può essere così suddivisa:

Finitura liscia

La parte finale della pavimentazione si presenta chiusa e compatta, generalmente indicata per pavimentazioni all'interno e generalmente asciutte. Tale finitura risulta essere meno sensibile allo sporco ed alle macchie, e sufficientemente antisdrucchiole, salvo utilizzi della pavimentazione in condizioni bagnate o con inquinanti sulla superficie. La gradazione della finitura può essere calibrata dall'operatore nelle operazioni di finitura, sempre considerando la disomogeneità del risultato dovuta alla manualità dell'operazione.

Finitura ruvida

La parte finale della pavimentazione ha un aspetto ruvido, anche rugoso se necessario, con un forte effetto antisdrucchiole. Viene utilizzata generalmente all'esterno, o dove il grip della finitura assume un ruolo determinante, ad esempio nelle rampe con leggera pendenza, in zone molto bagnate, ecc.

Calcestruzzo Stampato

È una tipologia di pavimentazione ad effetto decorativo che presenta in abbinamento alle prestazioni meccaniche di una piastra in calcestruzzo, un aspetto estetico particolare, con un profilo superficiale che ricorda, ad esempio, un pavimento in pietra, in masselli, in cotto, ecc.

Calcestruzzo decorativo

È un'ulteriore lavorazione che viene eseguita su una pavimentazione in calcestruzzo di tipo tradizionale per conferirle un aspetto estetico particolare quale, ad esempio, una forma anticata, dei disegni o delle colorazioni particolari; tali particolari effetti possono essere ottenuti, ad esempio, mediante specifici trattamenti chimici superficiali.

Calcestruzzo lavato

È costituito da una finitura superficiale particolare che lascia evidenziata a vista la grana dell'inerte, ottenuta mediante specifici trattamenti da applicare durante le operazioni di finitura della pavimentazione.

8.9 Influenza delle condizioni ambientali sulla posa del calcestruzzo

Analogamente a quanto già sopra evidenziato per la messa in opera del calcestruzzo in generale, la messa in opera di pavimentazioni industriali in calcestruzzo durante il periodo invernale, o in presenza di alte temperature, come pure in presenza di calcestruzzi caratterizzati da un valore di bleeding particolarmente accentuato, deve essere effettuata con attenzione, adottando accorgimenti correttivi nella scelta dei materiali e/o nelle modalità di messa in opera.

Le basse temperature ritardano tutti i processi di presa e d'indurimento del calcestruzzo, le operazioni di lavorazione e finitura vengono differite, l'evaporazione dell'acqua modificata.

Dovranno quindi essere presi alcuni accorgimenti tra i quali: utilizzare cementi a più alto calore di idratazione ed eventualmente dosaggi maggiori, utilizzare additivi invernali, diminuire il rapporto acqua/cemento, aumentare la temperatura del calcestruzzo con particolari accorgimenti allo scopo di diminuire gli effetti negativi della bassa temperatura e permettere le corrette operazioni di lavorazione in tempi adeguati nel rispetto delle norme sul lavoro e delle regole per la sicurezza, limitando in tal modo i conseguenti aggravii di costi risultanti.

Le operazioni di finitura possono essere migliorate mediante la protezione dei locali, il possibile riscaldamento degli stessi, l'impiego di attrezzature che facilitino le operazioni. In presenza di gelo, durante le operazioni di posa e nelle primi periodi di indurimento, ed in assenza di specifici accorgimenti, le operazioni di getto devono essere sospese. Nella stagione calda, al contrario, le reazioni vengono accelerate e anche le operazioni di getto e finitura dovranno essere conseguentemente accelerate. In questo caso si consiglia l'impiego di cementi più lenti e, ove possibile, minori contenuti di cemento, come pure l'impiego di prodotti ed additivi dedicati per temperature medio-alte. Le operazioni di finitura dovranno essere anticipate e il numero del personale adeguato ai tempi previsti per tali operazioni in relazione alle campiture di getto previste. In alcuni casi è preferibile iniziare le operazioni nei periodi meno caldi della giornata, evitando in ogni caso operazioni di finitura all'esterno in presenza di sole diretto nelle ore più calde. Si dovranno in questo caso adottare particolari modalità di stagionatura e, in generale, un adeguato prodotto stagionante dovrà essere applicato immediatamente alla fine delle operazioni di getto. Con temperature particolarmente elevate (30-35° C) si sconsiglia di effettuare lavori di pavimentazioni in calcestruzzo, specialmente all'esterno, a meno che non si adottino accorgimenti particolari. Nel caso di calcestruzzi caratterizzati da alto *bleeding* si deve rimuovere l'acqua superficiale in eccesso,

cercando di non rovinare eccessivamente la superficie e, se necessario, modificare il *mix design* del calcestruzzo.

8.10 Protezione del lavoro eseguito

Le caratteristiche prestazionali della pavimentazione raggiungono il loro massimo valore in relazione al tempo di stagionatura e delle condizioni termometriche presenti.

Per tale motivo, fino al raggiungimento dei valori prestazionali prestabiliti, la pavimentazione deve essere protetta e/o non sollecitata. Sono possibile deroghe solo se espressamente autorizzate dal Direttore dei Lavori dopo opportuna verifica delle caratteristiche prestazionali raggiunte e dopo l'esecuzione delle prove complementari.

In assenza di specifiche indicazioni, la pavimentazione non potrà essere sollecitata completamente prima di 28 giorni di stagionatura, accertando l'esito positivo delle prove previste.

Il traffico pedonale o limitato potrà essere autorizzato espressamente in relazione alle condizioni ambientali e prestazionali della pavimentazione, comunque indicativamente non prima di 7 giorni di maturazione.

8.11 Impiantistica

Poiché lo spessore della pavimentazione deve essere costante per tutta la superficie, va assolutamente evitato il passaggio di impianti (tubazioni, cablaggi) sopra la massicciata e di altri elementi che possano ridurre lo spessore o impediscano lo scorrimento della piastra.

8.12 Impianti di riscaldamento/raffrescamento a pavimento

Per quanto riguarda il riscaldamento a pavimento è obbligatorio effettuare, prima delle operazioni di posa di acciaio e calcestruzzo, tutte le prove di tenuta idraulica, alla presenza del Direttore Lavori. I tubi del riscaldamento a pavimento devono essere adeguatamente fissati e bloccati. La presenza di elementi dell'impianto, all'interno della lastra in calcestruzzo, potrebbe innescare fenomeni fessurativi; in tali casi è sempre richiesta quindi l'adozione di opportuni accorgimenti per contrastare la nascita del fenomeno (per esempio l'uso di rete elettrosaldata). È bene osservare che la presenza di strati di isolamento termico inferiore potrebbe favorire l'insorgere di fessurazioni e deformazioni, accentuate dai gradienti termici indotti dal riscaldamento. Nella progettazione e nella successiva messa in opera dell'impianto di riscaldamento, si deve verificare la compatibilità con i giunti di costruzione e di dilatazione del pavimento. Lo spessore di progetto va garantito dal lembo superiore di tali tubi. Inoltre, durante l'esecuzione dei getti, l'impianto va mantenuto in pressione al fine di individuare qualsiasi perdita dovuta alle operazioni di posa. In relazione agli impianti di riscaldamento a pavimento, si raccomanda inoltre quanto segue.

A stagionatura avvenuta deve essere sempre effettuato un ciclo di accensione progressiva dell'impianto in modalità riscaldamento, per verificare la funzionalità dell'impianto oltre che rendere la pavimentazione stabile. Di norma il ciclo di accensione si esegue mettendo in funzione l'impianto al minimo e aumentando la temperatura di 5° C al giorno fino al raggiungimento del regime massimo previsto in esercizio. Mantenuta la temperatura massima per almeno 5 giorni, si procede a ritroso, diminuendola di 5° C al giorno fino al raggiungimento della temperatura ambiente. La pavimentazione, sottoposta a questo ciclo, subisce uno shock termico che, frequentemente, provoca la comparsa di fessurazioni che devono essere valutate.

Il processo di avviamento del riscaldamento deve essere documentato.

Bibliografia

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – “Linee guida sul calcestruzzo strutturale”

Consiglio Superiore dei lavori pubblici – Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza

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

D.M. LL.PP. 14.01.2008 - Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e delle strutture metalliche.

“PROCEDURE DI SICUREZZA PER LA FORNITURA DI CALCESTRUZZO IN CANTIERE”
(Ministero del Lavoro)

UNI-EN 13670 Esecuzione delle opere in calcestruzzo- Parte 1- Parte generale.

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

UNI U50.00.206.0 Casseforme – Requisiti generali per la progettazione, la costruzione, l'uso.

UNI-EN 206:2014 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità.

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

UNI EN 12350 (parti 1 – 7) Prove sul calcestruzzo fresco: Campionamento, Prova di slump, Prova VeBè, Grado di compattabilità, Prova alla tavola a scosse, densità, Contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco, metodi a pressione.

UNI 11040 (marzo 2003) Calcestruzzo autocompattante – Specifiche, caratteristiche, e controlli.

UNI EN 13670 (gennaio 2010) Esecuzione di strutture in calcestruzzo

EN 13791 Assessment of concrete compressive strength in structures or in structural elements.

UNI EN 14487-1 Calcestruzzo proiettato - Definizioni, specificazioni e conformità.

UNI EN 14487-2 Calcestruzzo proiettato – Esecuzione.

CNR Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo ROMA –16 ottobre 2014.

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

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.

CIB/CEB/FIP W29 (85) “Manuale di tecnologia casseforme”

CIB W29 “Concrete Surface Finishings report n°24 Tolerances on blemishes of concrete”

DIN 18218 2010 Pressione calcestruzzo fresco su casseforme verticali.



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Servizio Tecnico Centrale

LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Settembre 2017

Documento positivamente licenziato con Parere n. 80/2016, espresso dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. nella adunanza del 30 marzo 2017

1 – GENERALITÀ.....	4
1.1 Campo di applicazione.....	4
1.2 Finalità	4
1.3 Glossario	5
2 – CONTROLLO DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA.....	5
2.1 Pianificazione delle prove in opera	6
2.2 Predisposizione delle aree di prova e metodi di indagine.....	7
3 - VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA MEDIANTE CAROTAGGIO	8
3.1 Prelievo di campioni mediante carotaggio	8
3.2 Stima della resistenza meccanica in situ mediante carotaggi, al fine di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera.....	9
3.3 Prescrizioni specifiche per la stima della resistenza in situ mediante carotaggi da utilizzare nella valutazione di costruzioni esistenti	13
4 – METODI INDIRETTI PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA.....	13
4.1 Generalità	13
4.2 Stima delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante l'indice di rimbalzo	14
(o sclerometrico)	14
4.2.1 Principio di funzionamento	14
4.2.2 Verifica dello strumento	15
4.2.3 Modalità di esecuzione.....	15
4.2.4 Elaborazione dei risultati	16
4.3 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera mediante la velocità di propagazione di micro-impulsi ..	17
(ultrasonici).....	17
4.3.1 Principio di funzionamento	17
4.3.2 Taratura dello strumento	17
4.3.3 Modalità d'esecuzione.....	18
4.3.4 Elaborazione dei risultati	18
4.4 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla forza di estrazione (pull-out).....	19
4.4.1 Principio di funzionamento.....	19
4.4.2 Taratura della strumentazione	19
4.4.3 Modalità di esecuzione.....	19
4.4.4 Elaborazione dei risultati	20
4.5 Stima delle caratteristiche meccaniche in opera in base alla profondità di penetrazione di sonde.....	20
4.5.1 Principio di funzionamento.....	20
4.5.2 Taratura della strumentazione	21
4.5.3 Modalità d'esecuzione.....	21
4.5.4 Elaborazione dei risultati	22
4.6 Stima delle caratteristiche meccaniche mediante l'impiego di metodi combinati	22
4.7 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro	23

4.7.1	Principio di funzionamento.....	23
4.7.2	Taratura della strumentazione	23
4.8	Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: determinazione della profondità di carbonatazione.....	23
4.8.1	Principio di funzionamento.....	23
4.8.2	Modalità di esecuzione.....	24
4.9	Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in sito	24
4.10	Ulteriori indagini strumentali sul calcestruzzo in opera.....	24
	Bibliografia.....	25

1 – 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 valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera mediante prove distruttive e non distruttive. Il documento ha l'obiettivo di fornire indicazioni finalizzate a normalizzare le procedure, evitare errori riconducibili a procedure improprie che possano pregiudicare le attese, in termini di resistenza e di durabilità, alla base del progetto nonché di scongiurare gli errori derivanti dalla inappropriata interpretazione dei risultati delle prove distruttive e non.

Nel seguito sono illustrati i sistemi di valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera effettuata, sia con metodi diretti (carotaggio), che con metodi indiretti; in particolare si citano i seguenti metodi indiretti: metodo sclerometrico, metodo a ultrasuoni, metodo basato sulla forza di estrazione di inserti (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'ideale 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 e 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, con riferimento alle vigenti *Norme tecniche per le costruzioni*, 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 delle opere realizzate in calcestruzzo, materiale versatile e per questo, a volte, manipolato con eccessiva confidenza trascurando i necessari accorgimenti.

1.1 Campo di applicazione

Le presenti Linee Guida si applicano prevalentemente al calcestruzzo per uso strutturale, armato e non, ordinario e precompresso, usualmente impiegato nelle costruzioni. Talune disposizioni, laddove applicabili, restano comunque valide anche per numerosi altri tipi di calcestruzzo conosciuti ed utilizzati – che potranno essere oggetto di future specifiche Linee Guida – quali ad esempio: calcestruzzo leggero, calcestruzzo fibrorinforzato, calcestruzzo autocompattante, calcestruzzo proiettato, ecc... Per i calcestruzzi ad alta resistenza si applicano le specifiche Linee Guida già esistenti.

1.2 Finalità

E' necessario chiarire, prima di passare ai contenuti del documento, che gli ambiti di applicazione e quindi le finalità delle presenti Linee Guida fanno riferimento a due diverse fattispecie:

- a) il caso in cui, con riferimento al Capitolo 11 delle vigenti Norme tecniche per le costruzioni, sia necessario verificare l'idoneità di un calcestruzzo messo in opera in relazione ai requisiti richiesti alla struttura, ovvero alla resistenza caratteristica prevista in progetto. In tale fattispecie l'obiettivo è quindi solo quello di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera controllando che la resistenza caratteristica strutturale in opera sia non inferiore ad una

percentuale prestabilita della resistenza caratteristica potenziale prevista in progetto (attualmente, tale percentuale, come nel seguito precisato, è pari a 0,85 R_{ck}). Per questo caso, si fa riferimento al successivo paragrafo 3.2.

b) il caso in cui, con riferimento al Capitolo 8 delle vigenti Norme tecniche per le costruzioni, sia necessario determinare il valore della resistenza media del cls da utilizzare ai fini della valutazione della sicurezza di una struttura esistente. In tale caso gli aspetti specifici sono riportati al successivo paragrafo 3.3.

1.3 Glossario

Si ritiene opportuno riportare, nel seguito, un *glossario* contenente la terminologia che verrà utilizzata nel presente documento, e che si auspica possa costituire un riferimento per tutti i tecnici i quali, a diverso titolo, si trovano ad operare nel campo delle prove distruttive e non.

L'utilizzo di una terminologia comune, infatti, può migliorare sensibilmente lo scambio di informazioni ed il dialogo fra diverse parti, in una materia abbastanza controversa e complessa.

R_c	Valore della resistenza misurata mediante prova di compressione su un cubetto prelevato all'atto del getto, confezionato secondo le indicazioni della UNI EN 12390 e maturato in condizioni standard (resistenza potenziale cubica)
f_c	Valore della resistenza misurata mediante prova di compressione su un cilindro standard ($d=15$ cm; $h=30$ cm) prelevato all'atto del getto e maturato in condizioni standard (resistenza potenziale cilindrica)
R_{ck}	Valore caratteristico di R_c
f_{ck}	Valore caratteristico di f_c
$R_{c, is}$	Resistenza cubica stimata all'interno della struttura (resistenza strutturale cubica)
$f_{c, is}$	Resistenza cilindrica stimata all'interno della struttura (resistenza strutturale cilindrica)
$R_{ck, is}$	Valore caratteristico della $R_{c, is}$
$f_{ck, is}$	Valore caratteristico della $f_{c, is}$
$f_{carota (h/d=2)}$	Valore della resistenza misurata su una carota estratta dalla struttura avente $h/d=2$
$f_{carota (h/d=1)}$	Valore della resistenza misurata su una carota estratta dalla struttura avente $h/d=1$

2 – CONTROLLO DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

Con riferimento a strutture nuove in cemento armato, le *Norme tecniche per le costruzioni* prevedono esplicitamente l'effettuazione di controlli 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 dal Direttore dei Lavori o da una persona di sua fiducia non soddisfino i criteri di accettazione della classe di resistenza caratteristica prevista nel progetto, o qualora sorgano dubbi sulla qualità del calcestruzzo, sulla sua messa in opera, costipazione o maturazione, è facoltà del Direttore dei Lavori richiedere l'esecuzione di prove da effettuare direttamente sulle strutture già realizzate. In questi casi si dovrà tenere debito conto dei possibili effetti dovuti alla posa in opera ed alla maturazione del calcestruzzo, sui risultati dei prelievi; per tale ragione la verifica o il prelievo in opera del calcestruzzo indurito non può essere sostitutivo dei controlli d'accettazione da eseguirsi su provini prelevati durante i getti, preparati, maturati e sottoposti a prova in conformità alla UNI EN 12390-parti 1, 2, 3 e 4.

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 vetustà del patrimonio edilizio nazionale e l'elevata pericolosità sismica dell'intero territorio nazionale comportano numerose situazioni in cui la stima della resistenza *in situ* della struttura si rende necessaria e preliminare 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;
- valutazione della capacità sismica ai sensi del capitolo 8 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni
- 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 o determinare la qualità di singoli elementi.

In ogni caso, il numero di campioni da prelevare dipende:

- dal grado di fiducia che si intende affidare alla stima della resistenza;
- dal volume di calcestruzzo sottoposto ad indagine;
- dalla variabilità dei dati o risultati che si presume di ottenere.

2.1 Pianificazione delle prove in opera

Le aree di prova, dalle quali 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 dall'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 divisione, in regioni di prova, di una struttura, presuppone 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.

Particolare attenzione deve essere posta nella pianificazione delle prove in opera per quanto riguarda i pali di fondazione e/o alcune opere speciali di fondazione, quali ad es. i diaframmi, per la loro criticità intrinseca alle condizioni del sottosuolo ove gli stessi sono realizzati. A tale scopo è raccomandabile annegare nel getto del palo o dei diaframmi (ove possibile) delle tubazioni idonee

al successivo accoglimento di una sonda ad ultrasuoni atta a verificare con adeguate metodiche la continuità strutturale del palo (in linea di massima per pali di diametro medio-grande sono sufficienti 3 tubazioni per palo disposte lungo la circonferenza per tutta la profondità del palo). Tale metodica consente con costi minimi in fase di getto di valutare con sufficiente sicurezza la continuità del palo per tutta la sua lunghezza e di contenere il numero ed i costi delle successive eventuali prove di portanza del palo.

2.2 Predisposizione delle aree di prova e metodi di indagine

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

E' sempre opportuno che le aree di prova risultino prive sia di evidenti difetti (vespai, vuoti, occlusioni ecc.), sia di materiali estranei al calcestruzzo (intonaci, collanti, impregnanti, ecc.), sia di polvere ed altre impurità; in genere, tutti questi fattori possono contribuire ad alterare il risultato e la significatività delle prove stesse.

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.

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

I metodi più semplici e che arrecano il minor danno alle superfici delle strutture, quali l'indice di rimbalzo e la velocità di propagazione, basati su fattori di correlazione, richiedono, per la stima della resistenza, calibrazioni complesse, mentre l'indagine mediante carotaggio, salvo il ricorso ad alcuni coefficienti correttivi, non richiede una vera e propria correlazione per l'interpretazione dei dati, anche se per contro determina un danno, sia pur localizzato, alla struttura ed è, evidentemente, più lenta ed onerosa. Il carotaggio è comunque il metodo di riferimento per la calibrazione (taratura) di tutti i metodi non distruttivi o semi-distruttivi.

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	Correlazione fra grandezza misurata e resistenza del cls
Carotaggio	Elevato	Lento	Moderato	Buona	Ottima
Indice di rimbalzo	Molto basso	Veloce	Nessuno	Interessa solo la superficie (1)	Debole
Velocità di propagazione di ultrasuoni	Basso	Veloce	Nessuno	Buona, se la prove è ben calibrata. Riguarda tutto lo spessore	Debole Da calibrare caso per caso (2)
Estrazione di inserti	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Buona (3)
Resistenza alla penetrazione	Moderato	Veloce	Limitato	Interessa solo la superficie	Debole

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

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

(3) Per i calcestruzzi di buona qualità (≥ 30 MPa). Modesta per quelli di qualità scadente.

Nella scelta della metodologia si deve tener conto delle seguenti caratteristiche:

- l'indice di rimbalzo permette di valutare le caratteristiche del calcestruzzo anche dopo breve periodo di maturazione, ma il risultato riguarda solo la superficie corticale del calcestruzzo;
- la velocità di propagazione, operando per trasparenza, richiede generalmente l'accessibilità di due superfici opposte; fornisce indicazioni prevalentemente sulla qualità del conglomerato all'interno della struttura, in particolare sulla presenza di discontinuità della matrice cementizia dovute a vuoti o fratture;
- la misura della resistenza alla penetrazione e della forza di estrazione caratterizzano la superficie esterna più in profondità, rispetto all'indice di rimbalzo, mediamente fra 4 e 8 cm; la prima è più idonea a saggiare elementi di grosse dimensioni, la seconda è più adatta anche ad elementi di ridotte dimensioni. Il loro impiego è consigliato per calcestruzzi di buone caratteristiche meccaniche.

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

3 - VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA MEDIANTE CAROTAGGIO

3.1 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 (*"Prove 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). Qualora ciò non potesse essere evitato ci si deve aspettare che si verifichi una riduzione nella resistenza;
- le carote che presentano difetti devono essere valutate con cautela e separatamente. Le imperfezioni possono essere dovute, ad esempio, alla presenza di microfessurazioni, vuoti e disomogeneità, generate da segregazione nella posa in opera;
- il rapporto altezza/diametro (snellezza) dei provini deve essere possibilmente pari ad 1 o 2; si deve generalmente evitare, salvo casi particolari, che i provini abbiano snellezza inferiore a 1 o superiore a 2. Possono essere considerate carote con rapporto nominale 2 quelle con rapporto h/d compreso nel range $1,95 \div 2,05$ mentre possono essere considerate carote con rapporto nominale 1 quelle con rapporto h/d compreso nel range $0,95 \div 1,05$;
- è consigliabile effettuare i controlli su carote di snellezza pari a 1 quando si vuole operare in termini di resistenza cubica e quindi effettuare il confronto con R_c , mentre si suggerisce una snellezza pari a 2 quando si vuole operare in termini di resistenza cilindrica e quindi effettuare il confronto con f_c ;

- i campioni estratti devono essere protetti nelle fasi di lavorazione e di deposito rispetto all'essiccazione all'aria (condizioni ottimali sono la vasca o la camera di maturazione). Prima della rottura i campioni devono essere tenuti per almeno 24 ore all'aria;
- nel programmare l'estrazione dei campioni, si deve tener conto che la resistenza del calcestruzzo dipende dalla posizione o giacitura del getto.

È inoltre necessario verificare accuratamente, prima di sottoporre i campioni alla prova di compressione, il rispetto delle tolleranze previste dalla UNI EN 12390-1 come ad esempio la planarità delle superfici d'appoggio (0.0006 d [mm]) e l'ortogonalità fra le basi e le generatrici (0.5 mm).

Il rispetto delle prescrizioni previste dalla UNI EN 12504, dal prelievo fino alla preparazione dei provini prima delle prove, consente la riproducibilità e la ripetibilità dei risultati; un approccio grossolano ed inadeguato nel prelievo, nella lavorazione o nella preparazione dei provini, comporta in genere risultati non coerenti, dispersi, non significativi. Per tale ragione è sempre necessario che l'utensile di taglio sia periodicamente affilato, che la carotatrice sia rigidamente ancorata alla struttura, che l'asportazione dei detriti sia continua e che venga sempre effettuata la rettifica delle superfici terminali. È opportuno rammentare che per i calcestruzzi a bassa resistenza, tanto l'estrazione che la successiva manipolazione, taglio e rettifica in laboratorio possono compromettere l'integrità del campione; inoltre, con calcestruzzi di queste caratteristiche, è sempre opportuno evitare la rettifica sostituendola con la meno invasiva cappingatura (capping).

La dispersione (variabilità) dei valori di resistenza tende ad aumentare al ridursi della dimensione dei campioni in prova ed all'aumentare del diametro massimo dell'aggregato. Si può minimizzare l'effetto della dispersione dei risultati aumentando il numero dei campioni di prova e quindi la loro rappresentatività statistica.

3.2 Stima della resistenza meccanica in situ mediante carotaggi, al fine di verificare l'accettabilità del calcestruzzo messo in opera

La resistenza determinata con i provini estratti per carotaggio R_{is} (che nel seguito si definisce *resistenza strutturale*) è generalmente inferiore a quella della resistenza determinata con i provini preparati nel corso della messa in opera del calcestruzzo, costipati e maturati in condizioni standard, R_c (che nel seguito si definisce *resistenza potenziale*) e che rappresenta il limite superiore di quella specifica fornitura). Fra i fattori che determinano tale differenza si possono citare, in termini di resistenza strutturale: le modalità di posa in opera e di compattazione, la maturazione (curing) e l'effetto del prelievo della carota. Il valore di compressione di una carota, infatti, è intuitivamente più debole del valore ottenuto dal suo equivalente provino (cilindrico o cubico, confezionato secondo UNI EN 12390-2) in quanto la superficie di carico della carota contiene frazioni di aggregato "tagliato" non interamente reagenti alla sollecitazione di carico e che contribuiscono, "per adesione", alla capacità di resistenza della carota e quindi in misura ridotta rispetto a quella di aggregati perfettamente inglobati nell'equivalente campione cilindrico.

In mancanza di un'esperienza diretta è infatti accettabile assumere che, a parità di tempo di maturazione, la resistenza strutturale (in situ) sia comunque non inferiore a 0,85 volte la resistenza del calcestruzzo messo in opera, come si vedrà nel seguito.

Il valore della resistenza ricavata dalle prove di compressione sui campioni ottenuti per carotaggio, da confrontare con il valore della resistenza caratteristica di progetto, deve essere elaborato con molta prudenza, in ragione della notevole influenza che diversi fattori hanno sulle caratteristiche delle carote, quali la messa in opera del calcestruzzo indagato, le condizioni di maturazione (di cui

già si è detto) e le modalità di prelievo delle stesse carote. La stima, e quindi il giudizio, della qualità del calcestruzzo in opera, formulata sulla scorta della resistenza determinata su carote prelevate, deve fare ricorso a correttivi per compensare il maggiore o minore effetto di confinamento, in funzione della snellezza del campione, applicato dalle piastre alle estremità del campione nella prova di compressione, ma soprattutto dell'effetto del disturbo causato dalle operazioni di prelievo: detensionamento del campione, annullamento del confinamento degli aggregati, deterioramento del legame all'interfaccia legante-aggregato dovuto alle azioni meccaniche di prelievo.

Si può infatti affermare che la resistenza alla compressione, determinata su carota, è penalizzata dalla riduzione in quota parte del contributo proveniente dagli aggregati presenti sulla superficie laterale della carota. Tale effetto, a parità di diametro del provino, viene minimizzato per calcestruzzi di classe di resistenza elevata e si riduce al crescere della dimensione massima degli aggregati presenti. Questa riduzione di resistenza deve essere considerata nel calcolo della resistenza strutturale, tramite l'introduzione di un coefficiente moltiplicativo detto **Fattore di disturbo F_d** .

Dall'esame della letteratura esistente sull'argomento si è riscontrato che il valore di F_d decresce all'aumentare della resistenza f_{carota} rilevata sulla specifica carota.

Si suggerisce quindi di adottare i valori riportati nella Tabella seguente:

Tabella del fattore di disturbo in funzione della resistenza a compressione delle carote ($h/d=1$; $d=100$ mm)

f_{carota} [N/mm ²]	10	20	25	30	35	40
F_d	1.10	1.09	1.08	1.06	1.04	1.00

Per valori intermedi si effettua l'interpolazione lineare, mentre per valori di f_{carota} superiori a 40 N/mm² il valore di F_d resta pari a 1.

Tali coefficienti andranno applicati al singolo risultato della carota. Il valore caratteristico derivante dall'elaborazione di tutti i risultati corretti sarà poi confrontato con il limite di 0,85 Rck di progetto ovvero potenziale come più avanti precisato.

La UNI EN 12504-1 prevede che, se la resistenza potenziale è espressa in valori cubici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto $h/d = 1$ (con tolleranza $\pm 0,05$); se invece la resistenza potenziale è espressa in valori cilindrici, l'eventuale determinazione della resistenza strutturale va effettuata su campioni ricavati da carote aventi rapporto $h/d = 2$ (con tolleranza $\pm 0,05$).

Pertanto, il valore della resistenza strutturale di ciascuna carota si determina come segue:

$$f_{carota} * F_d = R_{c,is} \quad \text{nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto } h/d=1$$

$$f_{carota} * F_d = f_{c,is} \quad \text{nel caso di provini ottenuti da carote con rapporto } h/d=2$$

Riguardo il fattore di conversione resistenza cubica/resistenza cilindrica 0,83 - che le norme tecniche vigenti utilizzano in ambito progettuale nel passaggio fra i due valori - è opportuno precisare che, da specifici studi effettuati, anche mediante una campagna di prove opportunamente realizzata sul territorio nazionale e coordinata da un Gruppo di Lavoro opportunamente nominato in ambito Osservatorio del Calcestruzzo, è stato dimostrato come tale fattore di conversione presenti un rilevante margine di variabilità in relazione ai diversi tipi di calcestruzzo. Per tale motivo, come già accennato, si raccomanda, in accordo con la UNI EN 12504-1, di utilizzare carote con rapporto

$h/d=1$ (eventualmente $h/d=2$); è comunque fortemente sconsigliato l'impiego di carote caratterizzate da un rapporto h/d intermedio.

Se, come già accennato, si definisce “resistenza strutturale” o “in situ” ($R_{c, is}$ e $f_{c, is}$) la resistenza del calcestruzzo in opera, misurata mediante il prelievo di una serie significativa di carote, e “resistenza potenziale” (R_c e f_c) quella misurata sui campioni convenzionali (vedi Figura 1), correttamente confezionati e maturati, si può assumere – secondo la letteratura tecnica-specialistica ed in mancanza di una sperimentazione specifica – che la resistenza strutturale sia non inferiore a 0,85 volte la resistenza potenziale del calcestruzzo messo in opera.

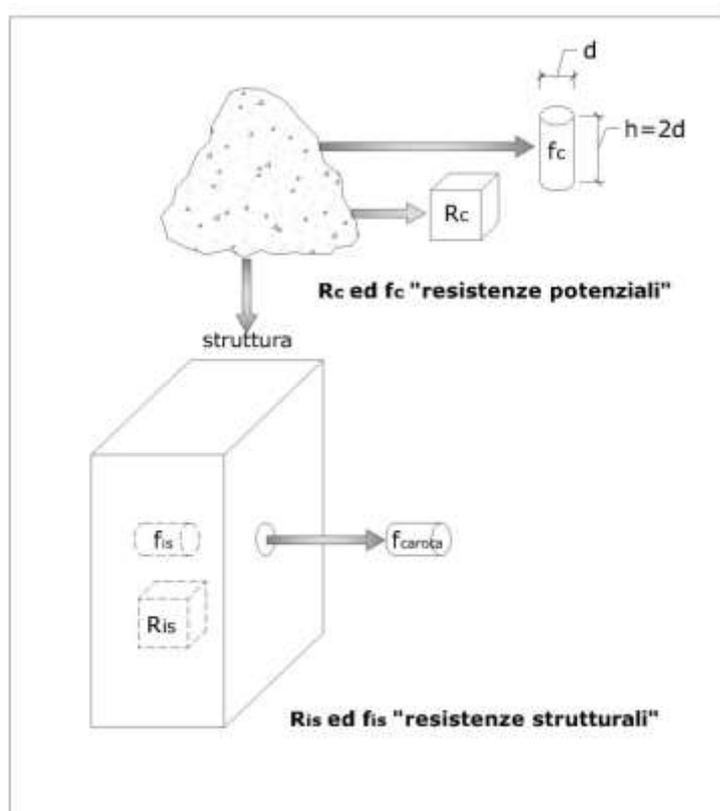


Figura 1 - Differenza concettuale tra resistenza potenziale e resistenza strutturale

In sintesi, in termini concettuali il confronto fra resistenza strutturale e resistenza potenziale risulta positivo se:

$$R_{c, is} \geq 0,85 R_c \quad \text{oppure} \quad f_{c, is} \geq 0,85 f_c$$

Sulla base di quanto sopra descritto, una volta determinato il valore della resistenza strutturale di ciascuna carota, si deve pervenire alla stima del valore della **resistenza caratteristica strutturale in situ** complessiva, che può essere direttamente confrontata con la resistenza caratteristica di progetto. In tal caso il criterio di conformità che deve essere applicato, come già detto, con riferimento a quanto contenuto nelle *Norme tecniche per le costruzioni* par.11.2.6 è rappresentato dalla disuguaglianza:

$$R_{ck, is} \geq 0,85 R_{ck} \quad \text{oppure} \quad f_{ck, is} \geq 0,85 f_{ck}$$

Per stimare la resistenza caratteristica in sito $R_{ck, is}$ o $f_{ck, is}$, si può fare riferimento al procedimento contenuto nella norma EN 13791, la quale, in funzione della effettiva numerosità dei campioni prelevati, considera: un approccio statistico, se la numerosità dei campioni è superiore a 15, ed un approccio forfettario, mediante il coefficiente k , se la numerosità dei campioni è inferiore a 15.

Pertanto, in presenza di carote correttamente estratte e caratterizzate da un rapporto $h/d=2$ quando si intende ricavare la resistenza cilindrica e da un rapporto $h/d=1$ quando si intende ricavare la resistenza cubica, la resistenza caratteristica strutturale in situ si determina come indicato nel seguito:

a) *numero delle carote prelevate maggiore o eguale a 15*

la resistenza cilindrica (cubica) caratteristica in sito $f_{ck, is}$ ($R_{ck, is}$) è il valore inferiore tra:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1.48 * s$$

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4$$

dove:

n = numero di campioni prelevati

$f_{m(n), is}$ = valore medio della resistenza a compressione degli n campioni (rammentando che per ciascun campione (i), la resistenza $f_{(i)}$ deve essere moltiplicata per il relativo Fattore di disturbo $F_{d(i)}$)

$f_{is, lowest}$ = valore minore fra le resistenze degli n campioni

s = scarto quadratico medio

b) *numero delle carote compreso tra 4 e 14*

la resistenza cilindrica (cubica) caratteristica in sito $f_{ck, is}$ ($R_{ck, is}$) è il valore inferiore tra:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k$$

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4$$

dove:

$k = 5$ per n (numerosità dei campioni prelevati) compreso tra 10 e 14

$k = 6$ per n compreso tra 7 e 9

$k = 7$ per n compreso tra 4 e 6 (caso da prendere in considerazione solo per opere di particolare semplicità).

In quest'ultimo caso l'uso del coefficiente k rappresenta un approccio forfettario che consente di "pesare" il valore medio della resistenza cilindrica (su carota) in funzione della numerosità dei campioni utilizzati e quindi in funzione dell'affidabilità del controllo stesso (la cui programmazione è responsabilità del Direttore dei Lavori).

Premesso che, secondo quanto stabilito dalle *Norme tecniche per le costruzioni*, la resistenza caratteristica R_{ck} di un calcestruzzo impiegato in un'opera è definita convenzionalmente come la resistenza ottenuta da campioni cubici prelevati dal getto e provati a 28 giorni di stagionatura, il metodo sopra descritto non può intendersi sostitutivo dei controlli di accettazione e deve essere utilizzato esclusivamente per esprimere un giudizio tecnico circa la conformità del calcestruzzo in opera, come peraltro precisato dalle stesse *Norme tecniche per le costruzioni* al par.11.2.6.

Anche ai fini della valutazione sulla durabilità dell'opera, in mancanza di specifiche prescrizioni, il progettista ed il Direttore dei lavori possono utilizzare il valore della resistenza caratteristica ottenuta da prove su carote, elaborate con il metodo di cui sopra, come valore da confrontare con la minima classe di resistenza necessaria per coprire la classe di esposizione richiesta, utilizzando il

prospetto 4 riportato nella UNI 11104 *Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1*. Resta comunque nella responsabilità di Progettista, Direttore dei Lavori e Collaudatore l'esecuzione in opera di tutte le prove necessarie per la valutazione dei requisiti di durabilità ai fini dell'utilizzo previsto nella condizione ambientale specifica.

3.3 Prescrizioni specifiche per la stima della resistenza in situ mediante carotaggi da utilizzare nella valutazione di costruzioni esistenti.

Nei casi in cui sia necessario valutare la resistenza in situ del calcestruzzo di strutture esistenti, preliminarmente alla progettazione del piano di prove strutturali, risulta di fondamentale importanza:

- acquisire tutta la documentazione disponibile (progetto originario ed eventuali atti di collaudo);
- stabilire, ove possibile, l'anno di progettazione;
- ricostruire la eventuale sequenza di esecuzione (sia in elevazione che in termini di corpi di fabbrica);
- effettuare considerazioni basate sulla pratica progettuale dell'epoca di costruzione ovvero sulle caratteristiche geometriche della struttura allo scopo di individuare elementi o parti che, per criterio di progetto o per condizioni di simmetria, siano stati dimensionati (e armati nel caso di strutture in cemento armato) allo stesso modo.

Nel caso di prove che vengano effettuate ai fini della valutazione della capacità di strutture esistenti, si ricorda che, ai sensi della Circolare n. 617, *“Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive”*.

Nel caso di costruzioni esistenti, non si farà riferimento ai valori f_{ck} ed R_{ck} , bensì si calcoleranno i valori medi cilindrici $f_{m(n)is}$ o cubici $R_{m(n)is}$, definiti come al punto a) del paragrafo precedente, ai quali andranno applicati i “fattori di confidenza” che ridurranno preliminarmente, in base al livello di conoscenza conseguito nelle indagini conoscitive, i valori medi di resistenza dei materiali della struttura esistente.

4 – METODI INDIRETTI PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO IN OPERA

4.1 Generalità

I metodi indiretti, di seguito descritti, si basano tutti sul principio della correlabilità tra parametri misurabili, riferiti alle porzioni più superficiali del calcestruzzo, e le caratteristiche meccaniche del materiale in opera, e più precisamente la resistenza a compressione. In considerazione della dispersione che spesso caratterizza l'impiego di tali metodi è appena il caso di rimarcare come la riproducibilità e ripetibilità dei risultati sia possibile solo se viene garantita l'esecuzione delle prove da personale qualificato, con attrezzature efficienti, ovvero regolarmente sottoposte a taratura e manutenzione, nel rigoroso rispetto delle specifiche tecniche di settore.

Ad oggi, a seguito della diffusione sul mercato di svariate tipologie di calcestruzzi, con caratteristiche tecniche molto diverse fra loro (calcestruzzi leggeri, calcestruzzi aerati, SCC ecc.), la correlabilità tra i parametri sopracitati non può essere definita da leggi e formulazioni univoche ma deve sempre tenere conto delle caratteristiche tecniche del materiale che si va ad investigare. È opportuno, quindi, precisare che l'uso di questi metodi deve essere limitato ai casi in cui sia nota la

legge di correlazione tra il parametro misurato e la specifica tipologia di calcestruzzo in esame. In assenza di ciò le stime possono servire solo come confronto dei risultati con valori noti e ad evidenziare eventuali anomalie e difformità rispetto a valori tipici.

È consuetudine suddividere i metodi in: non distruttivi, che non danneggiano sensibilmente la struttura in esame, e parzialmente distruttivi, che infliggono un danno accettabile, per di più generalmente 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 (pull-out) e l'infissione di sonde metalliche.

Poiché, come accennato, 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. E' evidente come la ripetibilità e riproducibilità, dei risultati dipendano in gran parte: dalla qualità delle attrezzature (calibrazione e manutenzione periodica e documentata); dalla esperienza e dalla formazione ed addestramento del personale che esegue le prove; dal rispetto rigoroso, da parte di operatori diversi, di una stessa procedura di prova definita da norme standard ove esistenti.

A tale garanzia quindi è necessario che tutti gli operatori che eseguono le prove, intesi sia come personale di società specializzate di settore che come singoli professionisti, siano in possesso dei requisiti sopradescritti, documentati e certificati.

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

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 12504-2 ("Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Indice sclerometrico").

4.2.1 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.

4.2.2 Verifica dello strumento

La verifica 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 serie di battute con lo sclerometro in posizione verticale secondo quanto indicato nella norma UNI EN 12504-2. Il corrispondente valore di taratura N_t non deve superare il valore di $N_0 \pm 3$.

Qualora N_t superi la tolleranza indicata dal produttore lo strumento non può essere utilizzato e deve essere sottoposto a revisione (pulizia e messa a punto).

Lo strumento deve essere utilizzato in un campo di temperature comprese nell'ambito del *range* previsto dalla norma UNI EN 12504-2.

4.2.3 Modalità di esecuzione

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

a) individuazione di una zona di misura che presenti le seguenti caratteristiche:

- assenza di ferri di armature in prossimità della superficie (da controllare mediante pacometro o altro idoneo strumento);
- 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 almeno 9 battute sclerometriche all'interno della zona di misura, secondo una griglia preliminarmente definita, mantenendo lo sclerometro perpendicolare alla superficie di misura. 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) calcolo della mediana dei valori degli indici di rimbalzo, tenendo conto dell'angolo α di inclinazione dello strumento rispetto all'orizzontale e verificare l'accettabilità del risultato in base al seguente criterio: se oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla mediana per più del 30% l'intera serie di dati deve essere scartata e le prove vanno ripetute in una nuova zona adiacente.

4.2.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione dei risultati delle prove sclerometriche, così come definita dal costruttore dello strumento, 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_t ;
- 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 mediana e del coefficiente di variazione dei valori utili degli indici di rimbalzo di ciascuna zona. La media sarà espressa come numero intero, il coefficiente di variazione con 2 cifre decimali.

La correlazione tra indice di rimbalzo N e resistenza a compressione R_c è del tipo rappresentato in Figura 2 e definito da una curva del tipo:

$$R_c = A * N^B$$

in cui i coefficienti A e B dovrebbero essere calibrati sullo specifico calcestruzzo indagato, mediante altri tipi di prove.

La curva tipo più comunemente utilizzata è la seguente; si precisa che i valori sugli assi variano in funzione della casa produttrice dello strumento:

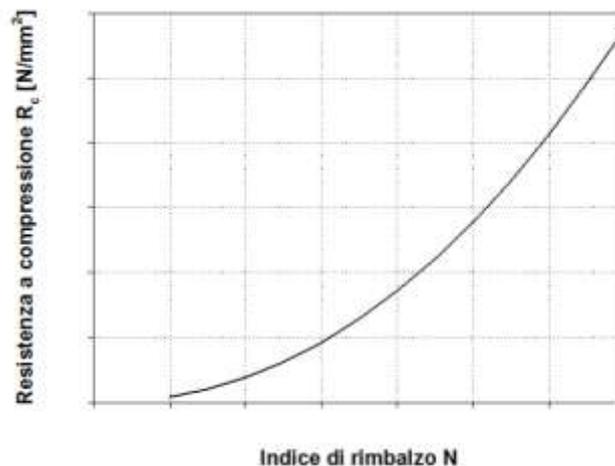


Figura 2 - Esempio di correlazione tra indice di rimbalzo e resistenza a compressione.

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

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 12504-4 ("Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici").

4.3.1 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 di tener conto delle proprietà meccaniche globali del materiale.

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 l'umidità, la composizione della miscela ed il grado di maturazione. La determinazione della velocità deve avvenire in un intervallo di temperatura compreso tra 5°C e 30°C, 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 idonei dispositivi.

4.3.2 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 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.).

Detta taratura sarà effettuata con l'utilizzo di campioni di prima linea muniti di certificato di taratura valido rilasciato da Laboratorio Metrologico accreditato in ambito EA secondo la norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2005 (*Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura* ed errata corrige 1 del 19-10-2007).

4.3.3 Modalità d'esecuzione

L'esecuzione delle prove si svolge 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;
- e) esecuzione delle misure nella zona individuata tramite 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);

si raccomanda, altresì, di:

- f) utilizzare, per le più comuni applicazioni, frequenze comprese tra i 40 kHz ed i 60 kHz e frequenze più basse di 40 kHz per indagare spessori elevati;
- g) curare l'allineamento delle sonde (trasmittente e ricevente) nelle letture per trasparenza perché modifica la reale lunghezza del percorso dell'onda con conseguente riduzione della velocità apparente;
- h) porre particolare cura nel controllare che, nelle aree di contatto, non ci siano granuli sciolti di aggregato fine interposti tra sonda e calcestruzzo.

Nel caso di misure dirette, in ogni area di misura si effettuano almeno 3 misure su percorsi diversi.

Nel caso delle misure indirette sono raccomandabili almeno 10 misure su percorsi opportunamente individuati.

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 e, in particolare, l'omogeneità dei valori di velocità (la differenza tra il valore massimo e minimo dovrebbe essere contenuta entro i $200 \div 300$ m/s).

4.3.4 Elaborazione dei risultati

L'elaborazione delle misure di velocità di propagazione di micro-impulsi consiste nel calcolo delle velocità di propagazione v_p con la seguente relazione:

$$v_p^2 = E_d/M_v * [(1- \nu) / (1+ \nu)*(1-2\nu)]$$

dove:

E_d è il modulo elastico dinamico in MPa

M_v è la massa volumica in kg/m^3

ν è il modulo di Poisson.

La velocità di propagazione v_p si esprime in m/s arrotondando il valore ai più prossimi 10 m/s.

In relazione a tale metodo di indagine, è importante precisare che la velocità degli ultrasuoni non può essere utilizzato come un mezzo di valutazione "assoluto" ma deve costituire esclusivamente un metodo di stima della resistenza a compressione, da valutare ed utilizzare sempre in associazione ai risultati ricavati dalle prove distruttive su carote estratte da getti omogenei di singole opere. Da

studi effettuati risulta, infatti, che la correlazione tra la resistenza a compressione R_c e la velocità di propagazione v_p non sia univoca ma strettamente connessa alle caratteristiche dello specifico calcestruzzo indagato e pertanto variabile da cantiere a cantiere; in sostanza il medesimo valore della velocità di propagazione v_p può essere riscontrato su un calcestruzzo $R_c = 30 \text{ N/mm}^2$ come su un calcestruzzo $R_c = 40 \text{ N/mm}^2$.

Nella letteratura corrente è spesso indicata una possibile correlazione tra la resistenza a compressione R_c e la velocità di propagazione delle onde elastiche v_p , rappresentata da una funzione esponenziale crescente:

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

in cui A e B sono coefficienti che devono essere opportunamente calibrati mediante prove distruttive su carote.

Tale curva di correlazione, che comunque andrebbe sempre riferita esclusivamente al calcestruzzo di una specifica opera, è tuttavia di difficile determinazione, a causa della scarsa attendibilità di cui si è detto sopra.

Si consiglia, pertanto, di utilizzare la velocità di propagazione degli ultrasuoni nell'ambito dei metodi combinati, di cui al paragrafo 4.6.

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

4.4.1 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 al momento del getto, 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 in genere migliore delle correlazioni esistenti tra resistenza a compressione e indice di rimbalzo o velocità di propagazione delle onde elastiche.

4.4.2 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 $\pm 2\%$.

4.4.3 Modalità di esecuzione

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

- a) si individua una zona di misura idonea;
- b) si stabiliscono i punti di misura, che non devono risultare coincidenti con aggregati affioranti e sufficientemente distanti dalle barre di armatura, dagli altri punti di misura e dagli spigoli dell'elemento;
- c) si effettuano, in ogni area di misura, 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 avvitalo con forza nel tassello;
- centratura del martinetto rispetto al tassello ed esecuzione della prova di estrazione; in tale operazione 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. In relazione a tale metodo di indagine, è opportuno rilevare l'importanza che assume il tipo di tassello utilizzato, che dovrà essere ad espansione geometrica controllata. In tal senso è sconsigliato l'impiego di tasselli destinati ad altri usi.

4.4.4 Elaborazione dei risultati

La correlazione tra la forza d'estrazione F, ricavata dalla pressione misurata al martinetto, e la resistenza cubica R_c è in genere del tipo rappresentato in Figura 6 e definito da una retta del tipo:

$$R_c = A + B \cdot F$$

in cui i coefficienti A e B sono opportunamente calibrati mediante prove distruttive a compressione su carote. La Figura 3 fornisce un esempio della relazione tra forza di estrazione e resistenza a compressione:

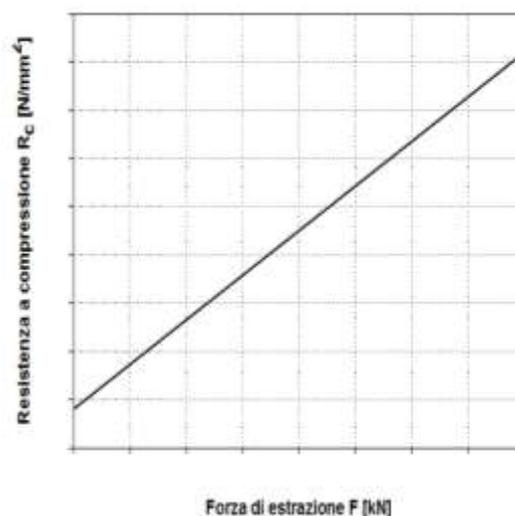


Figura 3 - Andamento della correlazione tra forza di estrazione F e resistenza a compressione R_c .

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

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

4.5.1 Principio di funzionamento

Nella tecnica basata sulla resistenza alla penetrazione, si misura la profondità di penetrazione nel calcestruzzo di una sonda (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.

4.5.2 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.

4.5.3 Modalità d'esecuzione

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

- a) si individua un'ideale zona di misura;
- b) si stabiliscono i punti di misura, che 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) si eseguono le prove; ogni prova deve essere costituita da non meno di 3 infissioni; tali infissioni possono essere eseguite utilizzando l'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 3 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 o più infissioni, si calcola 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) si rileva la durezza Mohs degli aggregati.

4.5.4 Elaborazione dei risultati

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 esprime in genere essa con una cifra decimale. La correlazione tra la lunghezza W e la resistenza cubica R_c è in genere del tipo rappresentato in Figura 4 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.

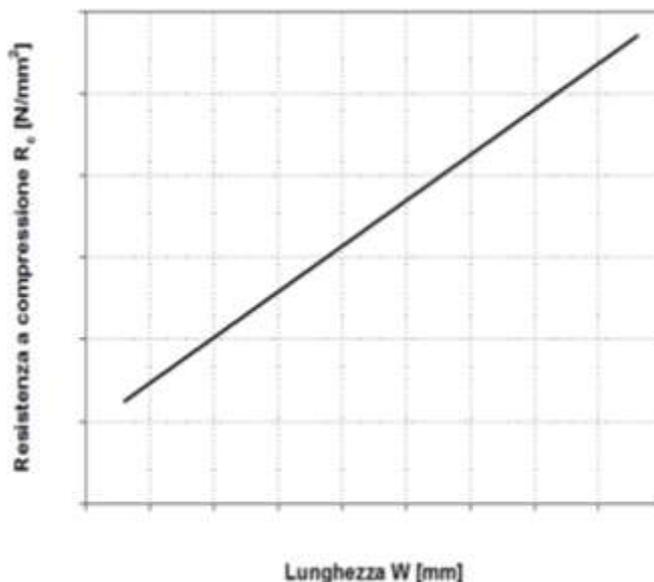


Figura 4 - Andamento della correlazione tra lunghezza [W] e resistenza a compressione [R_c].

4.6 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. Nel caso, ad esempio, del metodo SONREB, uno dei sistemi di combinazione più diffusi, sono utilizzate correlazioni del tipo:

$$R_c = A * v_p^B * N^C$$

dove:

v_p = velocità degli ultrasuoni

N = indice di rimbalzo

A, B, C = costanti di determinazione sperimentale mediante prove distruttive su carote utilizzando, ad esempio, la procedura 1 della EN 13791.

Nel caso di un numero limitato di coppie di misure distruttive e non distruttive, si potrà ricorrere a curve già disponibili in letteratura adottando la procedura 2 della EN 13791.

In alternativa potrà ricercarsi la curva di letteratura che fornisca i necessari coefficienti correttivi.

4.7 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: individuazione della posizione delle armature e stima dello spessore del copriferro

4.7.1 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, 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 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.

4.7.2 Taratura della strumentazione

La prova non è normalizzata. Occorre verificare il corretto funzionamento del pacometro prima dell'esecuzione di ciascuna campagna di prova per l'individuazione delle armature della struttura oggetto di indagine, secondo le istruzioni fornite dal produttore a corredo dello strumento.

4.8 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: determinazione della profondità di carbonatazione

4.8.1 Principio di funzionamento

Le procedure per l'esecuzione della prova sono descritte dalla norma UNI EN 14630 ("Determinazione della profondità di carbonatazione con il metodo della fenoltaleina") o nella UNI 9944 ("Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo."). 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.

4.8.2 Modalità di esecuzione

La prova può essere eseguita sia su campioni di calcestruzzo prelevati da un elemento strutturale mediante carote, micro carote, coni di estrazione, 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.

Prima della prova il campione deve essere ripulito da frammenti o detriti, e deve presentare bordi netti ed andamento possibilmente normale a quelli della superficie esterna.

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

Nel caso in cui la superficie in esame sia 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 ad essiccarsi. Si procede quindi applicando sulla superficie da esaminare una soluzione di fenolftaleina mediante pennello o nebulizzatore curando di non far colare la soluzione.

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.

4.9 Determinazione di altre proprietà del calcestruzzo in opera: valutazione della permeabilità del calcestruzzo ai gas e all'acqua in situ

La permeabilità del calcestruzzo in situ 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.

4.10 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

Consiglio Superiore dei lavori pubblici - Linee Guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza

Consiglio Superiore dei lavori pubblici - Linee guida per la produzione, il controllo ed il trasporto del calcestruzzo preconfezionato

D.M. LL.PP. 14.01.2008 - Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e delle strutture metalliche.

UNI-EN 13670 Esecuzione delle opere in calcestruzzo- Parte 1- Parte generale.

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

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

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

EN 13791 Assessment of concrete compressive strength in structures or in structural elements.

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

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

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

UNI EN 12504-4 Calcestruzzo nelle strutture – parte 4 – Determinazione della velocità di impulsi ultrasonici.

UNI EN 12390-2 Prova sul calcestruzzo indurito – Preparazione e maturazione dei campioni per le prove a compressione.

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.