

NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI

Il contributo di un operatore per equilibrare il ben fare con il ben conoscere

Giuseppe Felice Zambetti



Riletto e commentato da Filiberto Finzi

**Publicato con il patrocinio di ATE
ASSOCIAZIONE TECNOLOGI PER L'EDILIZIA**

Finito di stampare nel luglio 2009

“PREFAZIONE” di Filiberto Finzi

<< Il futuro ha radici antiche>> ... si usava dire.

Zambetti nel suo nuovo libro mostra che la più grande opera “in prefabbricato” (la piramide di Cheope) risale a 5.000 anni fa e che allora era già assai venerato il dio del calcestruzzo (il dio della “pietrificazione”) ... si vede che anche allora la propaganda dei produttori di leganti [ieri Natron + additivo (turchese macinato) oggi Cemento “blended” (CEM II) ... con tanti additivi] insisteva sul tema “pietra artificiale garantita eterna”!

Certo che se potessimo oggi garantire la durabilità della piramide di Cheope in breve tempo (10-20 anni!) ci troveremmo tutti disoccupati!

Quindi rovesciamo gli altari del dio della pietrificazione ed esaminiamo l'inquinamento ambientale ed i “nuovi materiali” che tanto faticano per conservarci un futuro operoso di lavoro di rifacimenti e ricostruzioni.

Fuori dallo scherzo, il lavoro di Zambetti è assai pregevole ed utile perché consente di capire in modo chiaro ed evidente che i conglomerati oggi realizzati possano essere (e per molta parte lo sono) assai diversi anche da quelli realizzati solo 10-15 anni fa.

Il gioco dei vari additivi, delle aggiunte e del calcolo di previsione delle caratteristiche (non l'idolatrato “mix design”) è chiarito su base di logica, buona chimica e buon senso.

Anche un lettore di onesta ma generica cultura come un ingegnere cantieristico della “catena” edile [progettista, direttore lavori, collaudatore in corso d'opera, manutentore e (figura oggi fondamentale!) diagnostico] può capire ed acquisire i mezzi per una diagnosi ed un intervento (solo se necessario!) sicuro.

L'opera riprende e completa il vecchio libro di Zambetti “Note sul Calcestruzzo” degli anni '80, libro “di parte” (era stato sponsorizzato dalla SIKA, allora regina degli “additivi”) su cui di nascosto (era una “reclame” perbacco!) tutti noi adoratori del calcestruzzo, prefabbricatori e non, abbiamo cominciato a cercare di capire e ad operare “sul campo”.

È un grande passo avanti!

INTRODUZIONE

Già nel 1982 mi cimentai nello scrivere un testo, **NOTE SUL CALCESTRUZZO**, che voleva essere ed è, una linea guida per chi deve operare con questo materiale, sia come Tecnologo, sia come Produttore, sia, perché no, come Progettista e Calcolatore della struttura in c.a.

NOTE SUL CALCESTRUZZO non è un trattato di chimica del cemento, se non per quanto è consentito ad uno che ha molto frequentato la bottega dell'alchimista, nè sul controllo della qualità e sul controllo della produzione, ma è un testo di formazione ancora oggi utilizzato per la preparazione del personale di vario livello, che chiarisce "in concreto" i principali aspetti relativi alle caratteristiche chimico-fisiche e dei processi che determinano le trasformazioni, nel tempo, di questo prodotto. Queste informazioni sono fondamentali per chi deve progettarne la miscela, reperirne le materie prime, produrlo e metterlo in opera, in funzione delle prescrizioni del Progettista.

L'attuale libro è la revisione ad oggi di Note sul Calcestruzzo, che aggiorna e porta quel testo nel nuovo secolo, nel segno della continuità tecnologica e dell'aggiornamento normativo e, mi auguro, della semplicità e chiarezza o, meglio, della concretezza.

Perché **NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI**?

- ✚ Perchè rispetto a quanto precedentemente espresso nel testo del 1984, in un arco di tempo di circa un quarto di secolo e quindi in un periodo apparentemente breve, molto si è evoluto nel campo della costruzione delle opere in calcestruzzo, non tanto in termini di tecnologia del prodotto, bensì di presa di coscienza che il calcestruzzo non è una pietra artificiale indistruttibile, bensì un materiale vivo, che sviluppa le sue prestazioni nel tempo e, qualora non ben protetto e sottoposto ad aggressioni, si degrada con riduzione delle proprie prestazioni. Questo ha comportato un'attenta evoluzione e revisione delle Norme e delle proprie conoscenze tecniche;
- ✚ perchè il Committente ha cominciato a valutare il non più sopportabile costo della manutenzione, riparazione e recupero delle opere ammalorate, vedi le nostre quotidiane peregrinazioni in autostrada per il lavori sui viadotti e nelle gallerie;
- ✚ perchè, infine, si è preso coscienza che viviamo in un'Europa che sarà, prima o poi, veramente unita e che in Europa si è innestato un processo di revisione delle Norme Tecniche e delle Prescrizioni sui materiali.

La durabilità del calcestruzzo, in particolare, è il tema dominante nel passaggio tra il primo ed il secondo millennio e, oggi, questa presa di coscienza deve portarci alla realizzazione di opere in calcestruzzo armato o non, la cui durata di vita sia conforme a quella del progetto, senza interventi di manutenzione straordinaria, bensì con la progettata e prescritta programmazione della loro manutenzione.

NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI vuole, quindi, ribadire ed evidenziare che un calcestruzzo è sempre costituito da un legante idraulico, dall'acqua, da uno scheletro rigido (l'aggregato), dagli additivi e spesso dagli aggiuntivi reattivi. La differenza tra un prodotto di qualità ed uno scadente, o meglio tra un prodotto di qualità mirata o non, consiste nella capacità di proporzionare correttamente questi costituenti, in particolare agli effetti della qualità della pasta di cemento, che contiene in sé tutte le principali proprietà prestazionali del conglomerato cementizio allo stato fresco ed indurito.

NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI cerca di fornire al lettore dell'attuale tempo un panorama su questi temi, legandoli agli argomenti tradizionali, che da sempre caratterizzano la produzione di questo ancora strategico materiale costruttivo, nello spirito di un'esposizione meno teorica possibile che possa soddisfare, ci auguriamo "concretamente", il più ampio spettro di Utenti.

NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI, per ultimo, vuole essere il contributo di un Operatore che, per oltre 40 anni, ha avuto frequentazioni con tutto il mondo che costituisce la cosiddetta “filiera del cemento armato”, con il Professionista e con il Produttore, nella convinzione che da una positiva revisione della conoscenza della tecnologia, tutte le parti attive nel processo di realizzazione delle opere in calcestruzzo possano trarne il proprio beneficio.

Mutuando una frase di colui che considero un mio maestro ed un “vecchio” amico, l’Ing. Filiberto Finzi, “sino ad ora avevamo la conoscenza delle cose ma non gli strumenti per ben fare”, oggi abbiamo anche gli strumenti per ben fare ma, spesso, abbiamo perso la sensibilità tecnologica e la capacità di sperimentazione e verifica, sostituita dalla asetticità dei programmi computerizzati.

Solo riequilibrando il saper ben fare con il ben conoscere, potremo riuscire a trasformare la conoscenza delle tecnologie in un progetto, che ci consenta di arrivare a formulare il calcestruzzo non per la migliore prestazione ma per quella congrua con la richiesta del Progettista.

Per questo motivo, rispetto a Note sul Calcestruzzo, vengono aggiunti tre capitoli, uno riguardante “il mettere in opera e conservare la qualità del calcestruzzo”, un secondo sui “calcestruzzi per applicazioni particolari”, quindi lo shotcrete, e l’ultimo sui “prodotti ed i criteri di scelta per gli interventi di manutenzione e riparazione”.

Non ho ritenuto di trattare di S.C.C., acronimo di Self Compacting Concrete, in quanto autori ben più preparati del sottoscritto ne hanno ampiamente scritto e parlato. Certamente si tratta della più importante, forse l’unica, grande innovazione nella tecnologia del calcestruzzo e della sua messa in opera, che nasce da una fortunata combinazione tra le nuove armi messe a disposizione del mondo della chimica per le costruzioni, i superfluidificanti della nuova generazione ed i viscosizzanti specifici, con la migliorata conoscenza dei fenomeni reologici della miscela, della sua viscosità e coesione nelle condizioni di elevata capacità di movimento e di autocompattazione. Tutti aspetti molto ben trattati ma che, in sostanza, non hanno portato al successo che questa tecnologia merita e che gli Addetti al lavoro si aspettavano. La mia personale opinione, è che non sia stata ben finalizzata la sua promozione, in quanto si è parlato e si parla comunemente di un prodotto, il calcestruzzo autocompattante, mentre si dovrebbe diffondere l’idea di un sistema, il Sistema S.C.C. È, infatti, questo concetto ad essere innovativo e, qualora adottato già in fase di progettazione della struttura e di organizzazione del cantiere, è evidente che il maggior costo del Prodotto S.C.C. potrà essere ampiamente compensato dal minor costo, ovvero dal maggiore valore aggiunto del Sistema S.C.C., sia in termini di minor onere del lavoro, di minor impatto ambientale nelle aree densamente abitate, di impieghi non possibili con la normale tecnologia, vedi il pompaggio dal basso per il riempimento di strutture complesse, di maggiore qualità delle superfici, sia agli effetti estetici, che della durabilità del calcestruzzo e della struttura.

Sostanzialmente, la tempestiva e progettata previsione di adozione del Sistema S.C.C. prima dell’inizio dei lavori, può portare a significativi vantaggi economici, quali:

- ⬇ rapido riutilizzo dei mezzi di trasporto;
- ⬇ riduzione dei tempi di realizzazione delle opere;
- ⬇ riduzione dei costi di CQ;
- ⬇ riduzione del personale e dei tempi di messa in opera e dei relativi costi.

Per quanto sopra, a fronte di un maggior costo del Prodotto S.C.C. generalmente quantificabile in un più 7 ÷ 8% rispetto a quello di un normale calcestruzzo avente la stessa classe di resistenza ed una classe di fluidità S5, il Sistema S.C.C. consente un risparmio sul costo del manufatto finito di almeno il 10%.

A questo, dobbiamo sommare altri importanti vantaggi, economicamente meno valutabili ma sicuramente apprezzabili, come ad esempio:

- ⬇ minore incidenza di malattie professionali;
- ⬇ migliore qualità dell’ambiente di lavoro;
- ⬇ riduzione rumore (lavoro notturno in aree abitate);
- ⬇ migliore finitura delle superfici, quindi incremento della durabilità del calcestruzzo e minori

- oneri per interventi di ripristino e cosmesi;
- nuove possibilità progettuali relativamente a sezioni, dimensioni, distanze fra elementi, geometrie;
- possibilità di realizzare manufatti sottili e fortemente armati o con geometrie complesse, anche con pompaggio dal basso per l'ottimale riempimento dei casseri (vedi foto).



La mia vuole essere solo un'osservazione ed un invito, nei confronti di chi si occupa di questo tema, per dare un nuovo impulso a questa innovazione, per renderla attuale o meglio, per "passare concretamente dalle parole ai manufatti".

Per ultimo, ma solo in ordine di tempo, grazie a Paola, mia moglie ma anche la fondamentale compagna della mia vita, per avermi supportato e sopportato quando mi sono cimentato nella scrittura del primo "Note sul Calcestruzzo", con i miei nervosismi ed impegni protratti sino a tarda notte, specialmente durante la preparazione di grafici e tabelle, tutti rigorosamente costruiti a mano, con penna, righello e trasferelli.

CAPITOLO I

Il calcestruzzo: la storia e le prestazioni

La pietra è stata ed è il materiale utilizzato per eccellenza dall'uomo per la costruzione delle proprie dimore, delle proprie tombe e dei luoghi di culto, tanto che tra loro si è creato un rapporto quasi sacrale, con la pietra frequentemente identificata come espressione dell'eternità e, di conseguenza, del divino. Un esempio di tale rapporto è fornito da uno dei più antichi popoli, quello egiziano, che venerò dal 3000 al 1800 a.C. (durante l'Antico Regno), una divinità di nome Khnun, che creò l'umanità impastando il limo del Nilo con natron e mafkàt. Per questo motivo, Khnun fu considerato il protettore dei vasai ma anche l'artefice della pietrificazione, cioè della agglomerazione artificiale della pietra [1].

IL proto-calcestruzzo e le piramidi egizie.

Dalla letteratura si legge che queste due sostanze, il natron ed il mafkàt, abbinate tra di loro, hanno un effetto legante [1]. Il natron è un sale di sodio che si trova allo stato naturale, mentre il mafkàt identifica un gruppo di silicati idrati, che potevano essere usati come catalizzatori nelle reazioni chimiche di "riaggregazione" delle pietre dure e, di conseguenza, del proto-calcestruzzo. Parliamo ancora di leganti naturali ma da questi nacque la ricerca, da parte dell'uomo, di come produrre la pietra artificiale con l'impiego di conglomerati da lui fabbricati attraverso processi "industrializzati" e ripetibili. Sono particolarmente interessanti gli studi di Guy Demortier sui blocchi costituenti la struttura portante della maggiore piramide d'Egitto, quella di Cheope (2625 a.C.), che confermano le teorie di Davidovits, cioè che questi sono costituiti da pietre riagglomerate con i leganti naturali prima descritti (natron, come fondente, più mafkàt), con l'aggiunta di fibre organiche quali capelli umani e peli di animali. Demortier così descrive il processo produttivo "un nitrato di sodio naturalmente cristallizzato, è stato mescolato con ghiaia di calcare ed acqua per dar vita ad un calcestruzzo antico, che veniva colato in una cassaforma per la prefabbricazione dei blocchi". Il composto così ottenuto consentiva di conferire ai blocchi artificialmente costruiti una diffusa resistenza a trazione, riducendone il comportamento fragile [2]. Si tratta, ovviamente, di ipotesi ancora in fase di approfondimento, suffragate dal riscontro di un tenore eccessivo di acqua, rispetto a quello normalmente rilevabile in una roccia viva, e dalla presenza di innumerevoli piccolissime bolle di aria, esattamente il tipo di bolle che si trovano nella pietra artificiale legata a cemento [3].).

I leganti artificiali primitivi ed il neo-calcestruzzo.

Sino dalla remota antichità, le sperimentazioni su minerali e sul loro trattamento col calore, generarono i procedimenti della ricerca alchemica e Davidovits [1] individuò le diverse fasi che caratterizzarono questa ricerca:

- la scoperta dello smalto, intorno al 4000 a.C.;
- l'uso dell'auto-smaltatura ottenuta da un miscuglio di natron e calce, intorno al 3600 a.C. e, nello stesso periodo, la scoperta del silicato di sodio e l'agglomerazione della pietra grazie al turchese (mafkàt) usato come catalizzatore;
- l'agglomerazione dei calcari alluminosi, per la costruzione di grandi blocchi, con soda caustica, intorno al 2700 a.C. (Arch. Imhotep, inventore delle grandi piramidi

In particolare nell'era neolitica, con la scoperta del fuoco e, forse, con la casualità attorno ad un focolare (circa 12.000 a.C.) si sperimentò che alcune sostanze, inizialmente l'argilla e successivamente la calce, derivata dal riscaldamento di un terreno calcareo, diventavano insensibili all'effetto dell'acqua anzi, qualora polverizzate, a contatto con l'acqua stessa queste sostanze generavano un impasto plastico che successivamente, in

fase di essiccazione, si induriva stabilmente.

Fu la scoperta del legante fabbricato, cioè della sostanza fondamentale per la realizzazione del conglomerato e, quindi, della pietra artificiale secondo un processo che potemmo definire industriale.

Il conglomerato legato con calce aerea, venne utilizzato quasi esclusivamente per la produzione di strutture massive, in particolare per la difficoltà di reperire depositi calcarei facilmente sfruttabili e, soprattutto, di buona legna per i forni. Come conseguenza, l'uomo pensò alla realizzazione di elementi composti da parti prevalentemente inerti, spesso prefabbricati in aree dedicate con l'impiego di mano d'opera specializzata, e successivamente trasportati al sito costruttivo utilizzando prevalentemente la forza umana.

Il più antico manufatto ufficialmente classificabile come realizzato con un calcestruzzo di pietra calcarea legata con calce, impastato e gettato in loco, è una pavimentazione a Yiftah, nella Galilea Meridionale, datata a circa 7000 anno a.C. [4]. Questa pavimentazione si presenta compatta e con una superficie dura e levigata, quale quella richiesta per un moderno pavimento industriali o commerciale. Un murale, rinvenuto a Tebe e risalente al 1950 a.C. illustra, invece, un primo esempio di conglomerato a base di calce realizzato in Egitto, quindi in un'era successiva a quella della costruzione delle grandi piramidi di Giza. Ma non solo le popolazioni medio-orientali conoscevano la proprietà legante della calce aerea, bensì anche i fenici e popolazioni a noi meno note. Eclatante è la scoperta, nel 2005, della Piramide del Sole Bosniaca a Visoko, cioè di una struttura alta 220 m e con basi di circa 360 m per lato, realizzata con blocchi di conglomerato composto da sabbia e ghiaia, legati utilizzando calce ottenuta dalla cottura di calcite e dolomite [5]. Da test effettuati presso l'Istituto dei Materiali dell'Università di Zenica, si sono potute rilevare resistenze a compressione elevatissime, anche superiori a 100 Mpa, paragonabili a quelle dei moderni calcestruzzi ad alta resistenza (A.R.) richiamati dalle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale. Questa è una straordinaria dimostrazione dell'efficacia della stagionatura protetta del conglomerato cementizio, in quanto la Piramide del Sole Bosniaca è rimasta, per molti millenni, coperta dal terreno e, di conseguenza, isolata dagli effetti aggressivi dell'atmosfera ed in condizioni di umidità ottimali

I romani ed il calcestruzzo: i primi leganti idraulici.

Nei secoli la tecnologia di produzione della calce andò affinandosi sino all'era romana, era nella quale si ebbero i primi veri riferimenti bibliografici su questo legante e sulla produzione del conglomerato [6]). La corporazione dei Calcis Coctores aveva definito le geometrie e le procedure di utilizzo del forno da calce (i fornax calcaria descritti da Plinio) e Marco Vitruvio Pollione, in De Architectura, è il primo vero scrittore tecnologico con un'opera enciclopedica costituita da dieci volumi, che è una vera e propria eredità storica dell'arte del costruire in quei tempi. Vitruvio chiama "saxum caementitium" un blocco costituito da rottami di pietra legati con calce. Sempre da un termine romano, il calcis structio che significa "struttura a base di calce", nacque il moderno nome "calcestruzzo". Attraverso l'influenza romana nei confronti di altre popolazioni, si svilupparono altri termini oggi d'attualità, vedi l'inglese "concrete" dal "concretum corpus ex elementis" per definire un "corpo composto da elementi diversi". Plinio il Vecchio (Storia Naturale del I° secolo d.C.) e meglio Vitruvio, che è colui che più tecnicamente descrive questi materiali, sono i maggiori punti di riferimento delle conoscenze tecnologiche all'inizio dell'era cristiana. In particolare, l'evoluzione verso i leganti idraulici attraverso la miscela tra calce e sabbia vulcanica o polvere di mattoni (con azione pozzolanica).

Si tratta della scoperta delle "proprietà idrauliche" di questi cementi primitivi e particolarmente significativi sono alcuni passi tratti dal Cap.VI° del libro II° di De Architectura:

"evvi ancora un altro genere di arena che produce effetti meravigliosi. Si trova nei dintorni di Baja e nei territori de' municipi, che sono intorno al Vesuvio; mescolata insomma di calce e pietre frantumate (in latino caementum) fa gagliarda non solo ogni specie di

costruzione ma particolarmente quelle che si fanno in mare sott'acqua. Sembra che questo avvenga perché sotto quei monti esistono caldissime terre e spesso sorgive di acque calde, le quali non vi sarebbero se non vi fossero sotto anche grandissimi fuochi alimentati da zolfo, da allume o dal bitume: i quali fuochi penetrando per li meati e bruciando, rendono leggera quella terra, onde il tufo ancora ivi nasce, rimane spugnoso e senza umido. Perciò venendosi a mescolare insieme queste tre cose, le quali sono state tutte alla stessa maniera formate dalla violenza del fuoco, ricevendo di botto l'umido fanno presa e, indurite dallo stesso umido, si rassodano tanto che non può scioglierle né l'onda né qualunque impeto d'acqua".

Ecco, quindi, descritta la caratteristica idraulica delle pozzolane naturali, attivate dalla calce e, attraverso le citazioni di Vitruvio, possiamo anche ricavare alcune ricette consigliate per la realizzazione di miscele idonee per specifici impieghi:

- per blocchi portanti, legare pezzi di pietra dal volume inferiore a quello della mano, con due parti di pozzolana ed una di calce;
- per pavimenti, legare tre parti di frantumi di mattone (nelle ville) o di pietra (nei depositi), con due parti di pozzolana ed una di calce.

E' interessante notare il rapporto, praticamente fisso, tra pozzolana e calce (per il legante) ed il fatto che si raccomandasse di costipare attentamente i calcestruzzi; Plinio, addirittura, consigliava di battere con mazze di ferro i fianchi dell'opera, per ottenere un ottimale rifluimento della boiaccia sulle superfici, in particolare nella costruzione delle cisterne.

I primi cementi moderni.

Durante il Medio Evo si ebbe un' evidente involuzione, per quanto concerne la tecnologia dei materiali e tale declino è spiegabile in varie modi:

- l'impossibilità, causa il periodo di oscurantismo (con il concreto rischio di denuncia per stregoneria), di tramandare i segreti del mestiere e, di conseguenza, la perdita della conoscenza degli accorgimenti da utilizzare;
- Il decadimento dell'arte della cottura della calce a seguito dell'utilizzo di forni non idonei;
- l'utilizzo di sabbie non lavate e quindi impure;
- l'abbandono dell'aggiunta di polvere di mattoni e/o di pozzolana;

Solo dopo il XII° secolo, con il Periodo Umanistico e con l'avvento dell'Era della Chimica, si ritornò alla scoperta delle antiche conoscenze e furono realizzate le prime evoluzioni tecnologiche (vedi Nomenclatura Chimica di Lavoiser, nato a Parigi nel 1743).

La rinnovata conoscenza scientifica e la pratica relativa alla buona produzione della calce portò, nel 1755, alla prima scoperta relativa ai cementi "moderni", ad opera del Prof. J. Black di Glasgow, cioè che cuocendo il calcare, quest'ultimo perde circa il 50% del proprio peso. La calce viva risultante, spenta con acqua, mediante un successivo processo di riassorbimento dell'aria fissa precedentemente persa durante la cottura, ripristina la sostanza di partenza, quindi il calcare, termine successivamente sostituito da quello "carbonato di calcio".

Fu solo nel XIX° secolo che si scoprì che per diventare idrauliche, le calce dovevano provenire da calcari contenenti un 6 ÷ 8% di argilla ed essere cotte a temperature superiori a quelle necessarie per ottenere le calce aeree (oltre 850°C).

Dalla scoperta delle proprietà idrauliche delle calce a matrice argillosa, un certo Parker brevettò il primo cemento veramente moderno, secondo il principio descritto nel brevetto relativo all'invenzione, cioè che il processo consiste "nel ridurre in polvere certi prodotti di pietra o materiali argillosi, chiamati noduli di argilla, e nel mettere in opera questa polvere con acqua, in modo da formare una malta o un calcestruzzo (concrete) più resistente e più duro di ogni malta o calcestruzzo (concrete) attualmente preparato per mezzo artificiale".

Successivamente, l'evoluzione del legante cementizio è stata continua, dal perfezionamento dei processi di selezione dei calcari a cura di Joseph Aspdin, all'intuizione di Isaac Charles Johnson, che nel 1844 riuscì a produrre un legante paragonabile all'odierno cemento Portland, portando la materia prima fino ad

un'incipiente vetrificazione. Con successivi perfezionamenti solo per quanto concerne i quantitativi dei suoi costituenti e delle granulometrie, siamo giunti ai nostri giorni, con la produzione di un materiale che, secondo una classificazione chimico – mineralogica, è definibile come:

- un eterogeneo sistema di aggregati minerali inorganici solidi, suddivisi e granulometricamente assortiti, normalmente plutonici (feldspato-silicei o ferro-magnesiaci) o sedimentari, calcarei in origine, immerso in una matrice composta di polibasici alcalini e alcaloidi silicatici sintetizzati, sospesi in una soluzione acquosa e in co-precipitata dispersione con altri ossidi anfoteri; questa matrice presenta originalmente la capacità di una progressiva dissoluzione, idratazione, recipitazione, gelatinizzazione e solidificazione, attraverso una continua e coesistente formazione cristallina, di tipo amorfo colloidale e crypto-cristallino, fundamentalmente soggetta ad alterazioni termo-allotromorfiche. Il sistema, una volta combinato, è provvisoriamente allo stato plastico e in questo periodo è deformabile sotto l'effetto di azioni esterne; nel tempo solidifica realizzando uno dei più semplici materiali da costruzione, di tipo artificiale, relativamente permeabile e capace di sviluppare resistenze alla compressione, alla trazione e al taglio, nonché di coesione.

Il calcestruzzo oggi.

Il calcestruzzo è, attualmente, il materiale strutturale più diffuso al mondo, in particolare per la sua duttilità d'impiego e per la sua compatibilità con l'acciaio, a formazione del cemento armato, con possibilità di studiare strutture molto variegate, massive ma anche sottili ed ardite, spesso fortemente sollecitate, lasciando ampio spazio alla capacità progettuale dell'architetto e dello strutturista., Con la definizione di calcestruzzo strutturale o structural concrete, in seguito al Simposio IABSE di Stoccarda nel 1990, si è inteso abbracciare tutti gli impieghi del calcestruzzo nelle strutture, dal calcestruzzo semplice a quello armato, da quello precompresso, a quello alleggerito e/o fibrorinforzato.

Il miglioramento delle caratteristiche del prodotto finito è sostanzialmente ascrivibile non solo ad una migliore preparazione tecnica degli addetti al settore, per altro supportati dalle ricerche effettuate presso i laboratori di Istituti Universitari e di quelli specializzati, ma anche al servizio di formazione ed assistenza che le Aziende produttrici di cementi e additivi per calcestruzzo sono in grado di offrire.

In particolare, la presa di coscienza che non ci troviamo di fronte a quella che era ritenuta “la pietra artificiale non degradabile”, bensì ad un materiale vivo e modificabile, anche negativamente, dall'ambiente nel quale vive, ho portato alla comprensione della necessità della sua corretta progettazione, in relazione al suo impiego ed alle possibili aggressioni naturali od artificiali, nell'atmosfera, nel terreno, o di tipo meccanico.

La nuova frontiera dell'evoluzione del calcestruzzo, è legata allo studio della sua reologia, quindi della sua viscosità e coesione nelle condizioni di elevata capacità di movimento e di autocompattazione, che ha portato alla proposta dell' S.C.C., acronimo di Self Compacting Concrete. Certamente si tratta della più importante, forse l'unica, grande innovazione nella tecnologia del calcestruzzo moderno e della sua messa in opera, che nasce da una fortunata combinazione tra le nuove armi messe a disposizione del mondo della chimica per le costruzioni, i superfluidificanti della nuova generazione ed i viscosizzanti specifici. SCC vuole anche dire ottimale compattazione nelle forme, alta qualità delle superfici e, come conseguenza, migliore prestazione agli effetti della durabilità dell'opera nel tempo.

Il calcestruzzo e le sue proprietà.

Il calcestruzzo, come abbiamo ampiamente descritto, è un conglomerato eterogeneo formato da un miscuglio di diversi componenti, con proprietà, interazioni e prestazioni differenti (Figura 1), variamente assortiti in funzione delle specifiche esigenze di ogni possibile applicazione.

Ne consegue che le caratteristiche del calcestruzzo non vanno intese in senso assoluto, bensì relativo, con riferimento all'impiego per il quale è destinato.

- **Lavorabilità**

La lavorabilità è definita come la facilità con la quale un calcestruzzo può essere mescolato, trasportato e lavorato senza perdere le sue caratteristiche di omogeneità.

Il grado di lavorabilità richiesto per un calcestruzzo cambia in relazione alle dimensioni della struttura, alla densità dell'armatura metallica, ai mezzi di messa in opera e di compattazione dell'impasto.

L'ultima vera innovazione riguardante il calcestruzzo, è legata a questo aspetto, cioè la sua autocompattabilità attraverso un attento studio della sua rheologia. L'SCC, acronimo di Self Compacting Concrete, è la proposta che compendia la necessità di sopperire alla carenza di quantità e qualità della mano d'opera, con quella di realizzare strutture adeguatamente addensate, agli effetti della loro qualità finale.

- **Resistenze meccaniche**

Le resistenze meccaniche sono definite come la capacità di un calcestruzzo di sopportare le diverse sollecitazioni cui è soggetta la struttura, quali la compressione, la flessione, la trazione. Come è noto, la funzione principale del calcestruzzo, nei calcoli statici per opere in c.a. normale e precompresso, è di sopportare i carichi a compressione, trasmettendo gli oneri più rilevanti per gli sforzi a flessione e trazione alle armature metalliche. Per questo motivo, salvo casi particolari, il calcestruzzo è definito in funzione della propria resistenza alla compressione, determinata solitamente dopo 28 giorni di stagionatura in condizioni di temperatura ed umidità normalizzate.

- **Durabilità**

La durabilità è definita come la capacità di resistenza che il calcestruzzo oppone ai fenomeni negativi derivanti dalle aggressioni a cui può essere sottoposto per effetto di azioni fisiche, chimiche, meccaniche.

Il degrado da azioni fisiche dipende principalmente dall'azione del gelo e disgelo, che provoca un susseguirsi di contrazioni e dilatazioni nella massa. Le caratteristiche di durabilità del calcestruzzo e le "alternanze dei cicli di gelo e disgelo" dipendono dalla sua maggiore o minore permeabilità; infatti i fenomeni di disgregazione delle strutture sono provocati dalle pressioni che l'acqua libera, solidificandosi per il gelo e aumentando di volume, esercita sulle pareti dei pori e dei capillari;

Il degrado da azioni chimiche è determinato essenzialmente dalle reazioni tra gli alcali del cemento e alcune componenti minerali degli aggregati, nonché dal contatto con i diversi agenti chimici esterni. Nel primo caso gli effetti del degrado sono caratterizzati dalla formazione di fessure diffuse con distribuzione irregolare, da fenomeni di espansione e rigonfiamenti, da essudazioni gelatinose e da depositi biancastri amorfi; si tratta di reazioni che coinvolgono le particelle degli aggregati, specialmente se contenenti idrati di silice amorfa opalina. Invece nel secondo caso i fenomeni di aggressione sono riconoscibili per la formazione di prodotti solubili, che vengono eliminati per lisciviazione, per combinazione col cemento e formazione di composti aventi una debole solubilità e infine per distillazione e cristallizzazione nei pori del calcestruzzo con disgregazione superficiale.

- **Permeabilità**

La permeabilità è definita come la capacità del calcestruzzo di impedire, o limitare, il passaggio dell'acqua, a diverse pressioni, attraverso la massa.

La permeabilità di un impasto di calcestruzzo dipende essenzialmente dalla distribuzione granulometrica degli aggregati, che deve essere la più continua possibile, dal rapporto ponderale/volumetrico tra gli aggregati ed il cemento e dal rapporto adottato tra acqua e cemento.

Per quanto concerne il confezionamento di un calcestruzzo a bassa permeabilità, è necessario ridurre al massimo i vuoti che si formano sia per l'evaporazione dell'acqua in eccesso non fissata chimicamente e fisicamente nella miscela sia, in seguito all'idratazione del cemento stesso, per la riduzione del volume assoluto dei prodotti, rispetto alla somma dei volumi assoluti del cemento e dell'acqua che entrano nella reazione.

- **Variazione di volume**

La variazione di volume definisce i fenomeni di dilatazione e contrazione del calcestruzzo stagionato per effetto della bagnatura, essiccazione e variazioni di temperatura.

È noto, infatti, come la formazione della pasta colloidale di cemento determini durante la fase di idratazione, un aumento del suo volume, quando l'umidità è assorbita ed una sua diminuzione, o ritiro, quando l'acqua è eliminata.

La contrazione per ritiro determina sforzi di trazione nel calcestruzzo e, come conseguenza della

sua limitata resistenza a quel tipo di sollecitazione, la formazione di lesioni nel caso questa tensione raggiunga un'entità apprezzabile.

Invece il coefficiente termico di dilatazione si definisce come la variazione di un'unità di lunghezza per ogni grado di variazione della temperatura.

- Deformazione plastica ed estensibilità

Queste proprietà del calcestruzzo, pur interferendo fra loro, sono di considerevole importanza. Si parla di deformazione plastica, o fluage quando ad un calcestruzzo viene applicato un carico costante; la deformazione prodotta è di due tipi: una elastica, che scompare non appena viene rimosso il carico ed una plastica, che si sviluppa gradualmente nel tempo. La deformazione plastica aumenta in funzione del contenuto d'acqua, di pasta cementizia e con l'intensità del carico; le resistenze meccaniche sono una funzione dell'elasticità, della deformazione viscosa e della resistenza a trazione del calcestruzzo ed il suo valore dipende non solo dalle proprietà del conglomerato cementizio, ma anche dal modo con cui il carico viene applicato. Pertanto un elevato grado di elasticità del calcestruzzo consente di sopportare le variazioni di volume dovute ai cambiamenti della temperatura nonché alle fasi di bagnatura ed essiccamento.

- Proprietà termiche

Le proprietà termiche riflettono la capacità del calcestruzzo di ridurre le proprie variazioni di volume nella massa, eliminando l'eccesso di calore determinato dalle reazioni tra il cemento e l'acqua e graduandone il trasferimento.

Per conduttività termica si intende l'unità di calore trasmessa attraverso il calcestruzzo in una determinata area e spessore, quando vi sia una differenza di temperatura tra le due facce.

La conduttività termica, con il calore specifico e la densità, è rappresentata da un coefficiente, detto "diffusività", rappresentativa della facilità con la quale il calcestruzzo può sopportare i cambiamenti di temperatura.

Concludo con un'affermazione di A. Neville, cioè di colui che ha fatto conoscere a tutti noi il calcestruzzo moderno, che ritengo particolarmente illuminante:

- ✚ un calcestruzzo di qualità congrua ed uno non idoneo, sono entrambi confezionati con cemento + acqua + aggregati + eventuali additivi. L'unica differenza tra i due prodotti è la corretta scelta dei componenti ed il loro proporzionamento. Può, spesso, verificarsi che un calcestruzzo correttamente progettato abbia un costo di produzione inferiore e, sempre, un maggiore valore aggiunto, rispetto a quello mal progettato per cattiva conoscenza, in quanto quest'ultimo è un prodotto che risolve il problema.

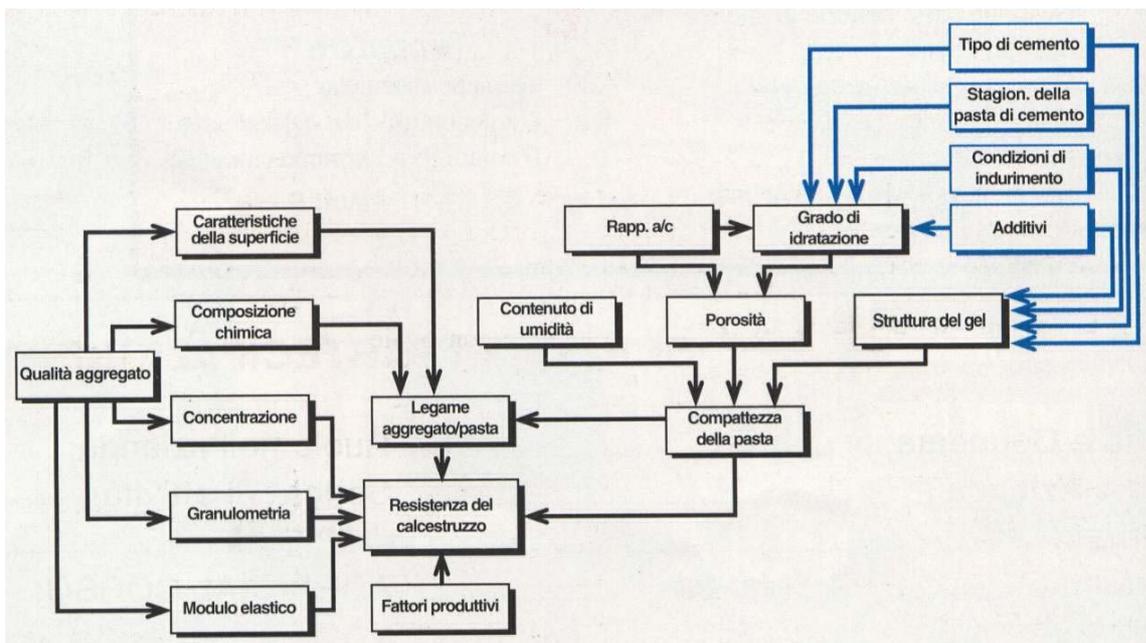


Figura 1 – Proprietà e parametri che condizionano le prestazioni del calcestruzzo.

Bibliografia

- [1] A. Arecchi “Hanno costruito le piramidi col calcestruzzo”
- [2] A.Perretti – A.Gherzi – S. Di Pietro “La continuità storica nell’evoluzione tecnologica e teorica del calcestruzzo”
- [3] H. Bergmann “F. Rothe “Il codice delle piramidi”
- [4] Forum Italiano Calce news – 4/08 – Maggio 2008
- [5] GOLD Expressnews “Antico calcestruzzo nelle piramidi bosniache”
- [6] Bringiotti “Calcestruzzo: tecnologia e mix-design”

CAPITOLO II

IL CEMENTO

Generalità: composizione e produzione

Il cemento è un legante idraulico che reagisce combinandosi con l'acqua; esso matura sia all'aria, che sotto l'acqua ed è il componente attivo fondamentale senza il quale è impossibile confezionare il calcestruzzo. Infatti il cemento, reagendo con l'acqua, ha la funzione di legare gli aggregati in un blocco compatto, dando al calcestruzzo stesso la definizione di "pietra artificiale".

È un prodotto, ottenuto dalla macinazione di quanto derivato dalla cottura di materiali naturali, il clinker, combinato con altri componenti. I componenti del clinker, che si distingue in naturale od artificiale, a seconda che sia ottenuto dalla cottura di marne o da una miscela, preparata artificialmente, di calcari, marne, argille, ecc., sono fundamentalmente:

✚ la calce, la silice, l'allumina, gli ossidi di ferro e di magnesio.

Le norme italiane emanate con la legge 26 maggio 1965, n. 595 – “Caratteristiche Tecniche e Requisiti dei Leganti Idraulici” prevedono una classificazione in:

✚ cementi normali e ad alta resistenza (portland, pozzolanici, d'alto forno);

✚ cementi alluminosi;

✚ cementi per sbarramenti di ritenuta.

Il D.M. 3 giugno 1968 definisce, inoltre, i requisiti di accettazione e le modalità di prova sui cementi, che sono indicati come normali, ad alta resistenza, ad alta resistenza e rapido indurimento; i criteri di distinzione variano in funzione dei limiti minimi delle resistenze meccaniche a compressione e flessione su provini di malta plastica, dopo diversi periodi di stagionatura variabili a seconda della classificazione del cemento (Tabella 1) oltre che di alcuni requisiti chimici e fisici a cui devono rispondere i vari tipi di cemento.

Gruppo	Tipo di cemento	Resistenza a compressione (kg/cm ²)					Resistenza a flessione (kg/cm ²)			
		1 gg	3 gg	7 gg	28 gg	90 gg	1 gg	3 gg	7 gg	28 gg
A	Normale	-	-	175	325	-	-	-	40	60
A	Ad alta resistenza	-	175	325	425	-	-	40	60	70
A	Ad alta resistenza e rapido indurimento	175	325	-	525	-	40	60	-	80
B	Alluminoso	175	325	-	525	-	40	60	-	80
C	Per sbarramenti di ritenuta	-	-	-	225	350	-	-	-	-

Tabella 1 - Requisiti meccanici dei cementi secondo d.m. 3 giugno 1968.

I cementi non devono trattenere, allo staccio formato da tela metallica unificata avente apertura di maglia pari a 0,18 mm (0,18 UNI 2331), un residuo superiore al 2%; inoltre i cementi normali, ad alta resistenza ed alluminosi non devono trattenere sullo staccio formato con tela metallica unificata avente apertura di maglia pari a 0,09 mm (0,09 UNI 2331) un residuo superiore al 10%.

Tutti i cementi non devono dare, nella prova di indeformabilità, un distacco delle punte degli aghi di controllo superiore a 10 mm; oltre a ciò vengono indicati i limiti dei tempi di inizio e fine presa, che sono determinati dall'inizio dell'impasto (Tabella 2).

Gruppo	Tipo di cemento	Inizio presa	Fine presa
A	Normale e ad alta resistenza	≥ 45'	≤ 12 h
B	Alluminoso	≥ 30'	≤ 10 h
C	Per sbarramenti di ritenuta	≥ 45'	≤ 12 h

Tabella 2 - Limiti dei tempi di inizio e fine presa determinati su pasta di cemento, secondo d.m. 3 giugno 1968.

Con la normativa europea UNI EN 197–1:1993 “Cemento: composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni” [1] che è stata recepita tramite decreto dell’aprile 1994, anche l’Italia si è uniformata al criterio della libera circolazione delle merci nella Comunità Europea.

Nell’attuale versione, UNI EN 197-1:2007 la norma è suddivisa sostanzialmente in quattro parti:

- ✚ definizione dei cementi e dei loro costituenti;
- ✚ classificazione dei cementi;
- ✚ requisiti chimici, fisici e meccanici;
- ✚ criteri di conformità.

Nella prima parte sono descritti i costituenti del cemento e per ciascuno vengono fissati i limiti di composizione, tali da garantire che il cemento prodotto soddisfi i requisiti di qualità prescritti.

L’aspetto innovativo della UNI EN 197–1:1993 [1] consiste nella classificazione dei cementi, distinti in cinque tipi principali e sottoclassificati con ventisette definizioni specifiche in funzione del contenuto di clinker e dei costituenti aggiuntivi (Tabella 3).

Le cinque famiglie fondamentali sono:

- ✚ CEM I – Cemento Portland (un solo tipo);
- ✚ CEM II – Cemento Portland Composito (17 sottotipi);
- ✚ CEM III – Cemento d’Altoforno (3 sottotipi);
- ✚ CEM IV – Cemento Pozzolanico (2 sottotipi);
- ✚ CEM V – Cemento Composito (2 sottotipi).

Per ogni classe di cemento vengono fissate due sottoclassi di resistenza, tali da identificare il loro sviluppo alle brevi stagionature, marcando con R quelle con la resistenza iniziale più rapida.

Ulteriore qualificante novità, consiste nella prescrizione di criteri statistici da utilizzare per il controllo della qualità del cemento, che non deve essere di verifica dei soli limiti, massimi e minimi, di alcune caratteristiche rilevate da singoli prelievi, ma della produzione totale.

Per questo motivo, per esempio, il requisito resistenza alla compressione viene calcolato con la formula

$$[(X_m - KA) \times S \geq L], \quad (1.1)$$

dove X_m è la resistenza media a 28 gg, KA è la costante di accettabilità (dipendente dal numero di prove effettuate), S è lo scarto quadratico medio dei dati di prova e L è il limite inferiore specificato in norma ($L = 32,5 \div 42,5 \div 52,5 \text{ N/mm}^2$).

La norma UNI EN 197-1 è il riferimento fondamentale per quanto concerne la classificazione dei cementi, in base al tipo e alla classe di resistenza e fornisce indicazioni circa i materiali costituenti e il loro range in massa, ribadendo, con una chiara e confermata definizione, che “il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott’acqua”.

Tipo Cemento	Denominazione	Sigla	Clinker %
CEM I	Cemento Portland	I	95 - 100
	Cemento Portland alla loppa	II/A-S	80 - 94
CEM II	Cemento Portland alla loppa	II/B-S	65 - 79
	Cemento Portland alla microsilice	II/ A-D	90 - 94
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P	80 - 94
		II/B-P	65 - 79
		II/A-Q	80 - 94
		II/B-Q	65 - 79
	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V	80 - 94
		II/B-V	65 - 79
		II/A-W	80 - 94
		II/B-W	65 - 79
	Cemento Portland allo scisto macinato	II/A-T	80 - 94
		II/B-T	65 - 79
	Cemento Portland al calcare	II/A-L	80 - 94
		II/B-L	65 - 79
Cemento Portland composito	II/A-M	80 - 94	
	II/B-M	65 - 79	
CEM III	Cemento Portland d'altoforno	III/A	35 - 64
		III/B	20 - 34
		III/C	5 - 19
CEM IV	Cemento Pozzolanico	IV/A	65 - 89
		IV/B	45 - 64
CEM V	Cemento composito	V/A	40 - 64
		V/B	20 - 39

Tabella 3 – Classificazione dei cementi secondo UNI EN 197-1 e del loro contenuto percentuale di clinker.

Classe (N/mm ²)	2 gg (N/mm ²)	7 gg (N/mm ²)	28 gg (N/mm ²)
32,5	-	≥ 16	≥ 32,5
32,5 R	≥ 10		≥ 32,5
42,5	≥ 10	-	≥ 42,5
42,5 R	≥ 20	-	≥ 42,5
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5
52,5 R	≥ 30	-	≥ 52,5

Tabella 4 – Classificazione dei cementi in funzione dello sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione secondo UNI EN 197-1.

Tutti i cementi richiamati dalla UNI EN 197-1 [1] sono ottenuti per macinazione di clinker di Portland con gesso e altri eventuali costituenti.

Il clinker di Portland si ottiene per cottura di una miscela di calcarea, marne e argille (la miscela cruda) i cui principali costituenti chimici sono:

- 🚩 la calce, ovvero l'ossido di calcio (CaO);
- 🚩 la silice, ovvero l'ossido di silicio (SiO₂);

✚ l'allumina, ovvero l'ossido di alluminio (Al_2O_3).

Oltre a questi, troviamo piccole percentuali di componenti secondari ed impurità, quali ad esempio:

- ✚ il sesquiossido di ferro (Fe_2O_3);
- ✚ il sesquiossido di manganese (Mn_2O_3);
- ✚ l'ossido di magnesio (MgO);
- ✚ l'ossido di titanio (TiO_2);
- ✚ l'ossido di sodio (Na_2O);
- ✚ l'ossido di potassio (K_2O).

La miscela di questi composti può avvenire per via umida o per via secca, a seconda che siano ricavati da minerali con alto contenuto di acqua o da minerali duri.

Ad avvenuta preparazione della miscela, che può quindi presentarsi sotto forma di pasta o di farina, si procede alla fase di cottura in appositi forni di tipo verticale o meglio di tipo orizzontale, che consistono in cilindri di scarico, rivestiti internamente con mattoni refrattari e che girano lentamente sul proprio asse, i cosiddetti forni rotativi (Figura 2).



Figura 2 – I forni rotativi.

La temperatura di cottura è portata progressivamente a $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$, determinando differenti reazioni fisiche e chimiche, tra le quali:

- ✚ disidratazione, ossia evaporazione dell'acqua libera e combinata, fino ad una temperatura di circa 700°C ;
- ✚ decarbonizzazione e calcinazione, ossia liberazione dell'anidride carbonica e volatizzazione degli alcali tra i 900 e 1000°C ;
- ✚ cottura o clinkerizzazione, ossia formazione di una serie di composti chimici, il silicato tricalcico, indicato con C_3S e denominato alite, il silicato bicalcico, indicato con C_2S e denominato belite, l'alluminato tricalcico $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$, indicato con C_3A e l'alluminato ferrite-tetralcico $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, indicato sinteticamente come C_4AF e denominato celite.

Ciascuno di questi costituenti possiede proprietà particolari e il comportamento del cemento nei confronti della presa, dell'indurimento, del calore di idratazione, della stabilità chimica e così via, dipende in massima parte da tali proprietà e dalle proporzioni con cui i costituenti sono presenti nel clinker. In particolare, il silicato tricalcico, impastato con l'acqua, sviluppa un elevato calore durante la presa ed è particolarmente importante ai fini delle resistenze alle brevi stagionature; invece, il silicato bicalcico sviluppa nel tempo calore ed è il costituente al quale si devono attribuire soprattutto le resistenze alle lunghe stagionature.

I due alluminati, benchè si idratino rapidamente, sono in proporzione limitata nel clinker e la loro azione non è sostanzialmente sentita.

In un clinker si hanno approssimativamente le seguenti proporzioni:

✚ $C_3S + C_2S = 75\%$;

✚ $C_3A + C_6AF = 25\%$.

Ottenuto il clinker, che si presenta sotto forma di granuli di diversa pezzatura, si provvede alla sua macinazione, previa aggiunta di quantitativi variabili di gesso/anidride ed altro, al fine di regolarizzare il processo di idratazione.

Il problema della macinazione è molto importante ed è controllato attentamente dalle cementerie, in quanto il cemento è in grado di reagire rapidamente con l'acqua soltanto quando sia stato finemente suddiviso; questa reazione è tanto più rapida quanto più elevata è la finezza di macinazione. Attualmente per questa operazione si usano molini a sfere (Figura 3), nei quali la macinazione avviene per urto del clinker con una serie di sfere di acciaio, che sviluppano un movimento rotatorio.

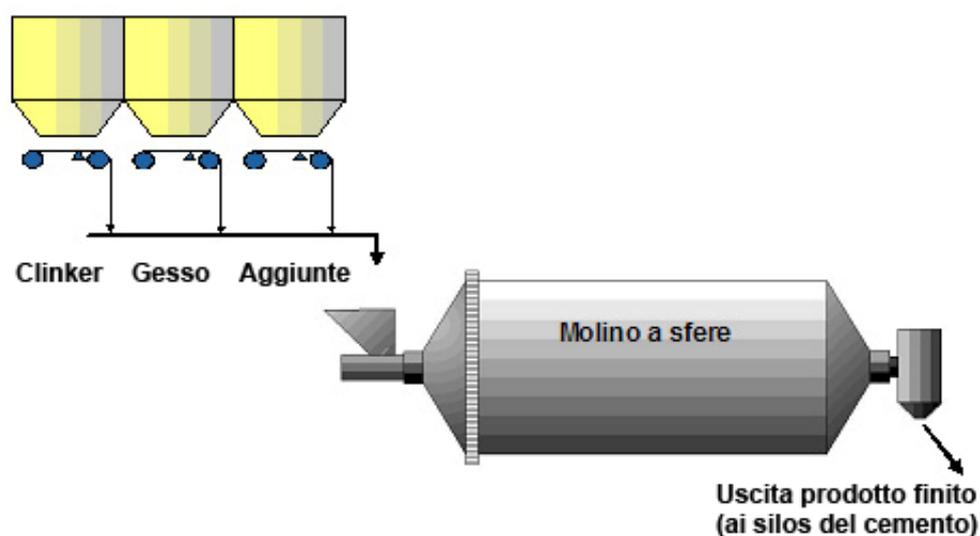


Figura 3 - Schema di funzionamento di un molino a sfere.

Da quanto detto poc'anzi risulta evidente che la velocità d'indurimento di un Cemento Portland è funzione della velocità d'idratazione delle sue particelle.

Nella Tabella 5 indichiamo sinteticamente l'influenza dei diversi componenti sulle proprietà del cemento.

Proprietà del cemento	C3S	C2S	C3A	C4AF
Velocità di reazione	media	Lenta	veloce	veloce
Calore di idratazione	medio	Basso	grande	medio
Sviluppo delle resistenze iniziali	veloce	Basso	veloce	veloce
Sviluppo delle resistenze finali	basso	Buono	basso	basso

Tabella 5 - Influenza dei componenti sulle proprietà del cemento.

A questo proposito si segnala che in alcune norme di accettazione dei leganti, i cementi sono definiti con parametri chimici, detti indici o moduli, che in pratica individuano il proporzionamento delle miscele crude utilizzate per la fabbricazione dei vari cementi.

I rapporti dei componenti principali, introdotti da Kühl [2], sono:

$$\text{modulo idraulico} = \text{CaO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.2)$$

che   detto anche rapporto di composizione. Con l'aumento del suo valore migliora l'indice di idraulicit  del cemento, che dovrebbe essere inferiore a 1,70;

$$\text{modulo silicico} = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (3.2)$$

che indica se ci si trova in presenza di cementi pi  o meno ricchi di silice, con corrispondente variazione, con segno opposto, dei fondenti; come modulo silicico medio si indica un valore tra 2 ÷ 2,5; un modulo silicico elevato oscilla tra 2,5 ÷ 3,5, mentre un modulo silicico basso ha valori compresi tra 1,7 ÷ 2,0. Con un modulo silicico eccessivamente elevato si riscontrano difficolt  di cottura per scarsit  di fondenti;

$$\text{modulo dei fondenti} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (4.2)$$

che esprime il rapporto tra l'allumina e l'ossido ferrino;

$$\text{modulo calcare} = \text{CaO}\% - [1,65(\text{Al}_2\text{O}_3\% - 0,64 \text{Fe}_2\text{O}_3\%) + 1,4 \text{Fe}_2\text{O}_3\%] / \text{SiO}_2 \quad (5.2)$$

coincidente al rapporto tra la calce, che contribuisce a formare i silicati e la silice che con essi si combina. Questo modulo, detto anche calce standard,   tenuto in particolare considerazione da Kühl [2], in quanto indica la percentuale della calce standard presente nel cemento. Con un valore del modulo calcare vicino a 2,70 e quindi considerevolmente elevato, si ha la produzione di cementi con elevate percentuali di silicato tricalcico, ossia dei cosiddetti supercementi.

L'idratazione del cemento

Quando il cemento   impastato con l'acqua, tra i suoi costituenti e l'acqua stessa si determinano reazioni chimiche di idrolisi e di idratazione cosicch  al posto dei costituenti anidri, instabili in presenza di acqua, si sostituiscono componenti idrati stabili.

Per idrolisi s'intende la reazione di un sale con l'acqua e per idratazione la semplice addizione di acqua al sale. Il silicato tricalcico e quello bicalcico, reagendo con l'acqua, si idrolizzano e si idratano, dando luogo ad una massa gelatinosa di idrosilicati di calcio (gel), che secondo Michaelis [3]   di natura colloidale, mentre secondo Le Chatelier [4]   di natura cristallina ultramicroscopica.

Durante la formazione degli idrosilicati, la calce in eccesso si libera per idrolisi e con l'acqua produce cristalli di idrato di calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

L'alluminato tricalcico e l'alluminato ferrito tetracalcico, reagendo con l'acqua in presenza dell'idrato di calcio, danno luogo alla formazione di cristalli aghiformi e filamentosi, di sferaliti e di lamelle esagonali, che parrebbero costituite da alluminato tetracalcico idrato e da ferrito tetracalcico idrato.

L'idratazione dell'alluminato tricalcico   rapidissima, mentre   rapida quella del silicato tricalcico; al contrario quella del silicato bicalcico e dell'alluminato ferrito tetracalcico   molto pi  lenta.

Come si   gi  indicato, il processo di idratazione inizia dalla superficie dei granuli di cemento, che si rivestono di uno strato gelatinoso costituito da idrosilicati di calcio; questo film essendo impermeabile, rallenta l'ulteriore penetrazione dell'acqua all'interno dei granuli. Approssimativamente possiamo ritenere che l'acqua penetra, in ogni granulo, sino a mezzo micron nelle prime 24 ore, sino a 2 micron nella prima settimana, sino a 4 micron nel primo mese e che in seguito si introduca sempre pi  lentamente .

Questo spiega l'importanza di una elevata finezza di macinazione, anche sulle resistenze a lunga stagionatura, in quanto con granuli di grande diametro l'idratazione   incompleta persino dopo lunghi periodi di tempo.

Quindi la pasta di cemento   costituita da un insieme di granuli, a volte raggruppati o flocculati, i cui interspazi sono in comunicazione tra loro e sono riempiti con acqua, che   distribuita secondo una ripartizione grossolana, detta acqua capillare.

Con l'aumento del grado di idratazione, il sistema dei canalicoli capillari perde di continuit  e le cavit  dei capillari sono collegate soltanto attraverso i pori del gel.

Il cemento, durante il suo processo di idratazione fissa, approssimativamente rispetto al proprio peso, un quarto di acqua fissata chimicamente o acqua stechiometrica e successivamente un

valore pari al $15 \div 19\%$ sotto forma di acqua fissata fisicamente negli interspazi tra le lamelle del gel di cemento. L'acqua stechiometrica è eliminabile solo per calcinazione, mentre quella nel gel può evaporare solo con temperature superiori a 110°C . In totale l'acqua detta non evaporabile oscilla normalmente tra il 40 ed il 44% rispetto al peso del cemento; ciò contribuisce al processo di idratazione del legante, senza tuttavia favorire mutamenti delle proprietà reologiche della pasta cementizia. Solo l'acqua in eccesso, detta acqua libera ed evaporabile alla temperatura ambiente, è efficace in questo senso; nondimeno, con la sua eliminazione, si determina la formazione di un reticolo capillare più o meno intercomunicante, causa della maggiore o minore permeabilità e durabilità della pasta cementizia.

Secondo Powers [5], è possibile calcolare la porosità di una pasta di cemento come la somma di:

- ✚ una porosità intrinseca del gel di cemento pari al 28%, saturata da 19 litri di acqua fissata fisicamente;

- ✚ una porosità per evaporazione dell'acqua libera, cioè variabile.

L'acqua fissata chimicamente non contribuisce alla formazione dei pori capillari.

Esempi per un dato cemento

Per un rapporto $a/c = 0,60$ si ha:

- ✚ acqua fissata chimicamente litri 25, con porosità dello 0%;

- ✚ acqua fissata fisicamente litri 19, con porosità del 28%;

- ✚ acqua libera, evaporabile litri 16, con porosità del 16%;

- ✚ POROSITÀ TOTALE = 44%.

Per un rapporto $a/c = 0,44$ si ha:

- ✚ acqua fissata chimicamente litri 25, con porosità dello 0%;

- ✚ acqua fissata fisicamente litri 19, con porosità del 28%;

- ✚ acqua libera, evaporabile litri 0, con porosità dello 0%;

- ✚ POROSITÀ TOTALE = 28%.

In Figura 4 si nota che, se si prendono 100 Kg di cemento e si determina esattamente la quantità d'acqua necessaria per idratarlo, si ricava che la stessa è suddivisa in:

- ✚ acqua stechiometrica, non evaporabile = 23 l;

- ✚ acqua del gel, evaporabile a 110°C = 19 l.

Il totale dell'acqua fissata è quindi di 42 l; quindi all'inizio della reazione d'idratazione si ha 31,75 l di cemento + 42 l d'acqua, corrispondenti a 73,75 l di impasto teorico. Questi due volumi, combinati chimicamente tra di loro, danno luogo a 67,91 l di gel di cemento, con una contrazione di circa l'8% rispetto alla somma dei volumi dei singoli componenti. Questa differenza è dovuta all'evaporazione di buona parte dell'acqua, con conseguente formazione di capillari vuoti. Se il quantitativo di acqua impiegato è inferiore a quello necessario per idratare il cemento, rimane ovviamente un quantitativo di cemento anidro.

Di conseguenza, se per un cemento per il quale sia necessario un rapporto $a/c = 0,40$ affinché avvenga la completa idratazione, si adotta un rapporto $a/c = 0,32$, si rileva che l'acqua capillare si è completamente consumata in corrispondenza di un livello di idratazione pari all'80% (Figura 5).

Da quanto si è detto, risulta anche evidente che tanto più il rapporto a/c è superiore a quello necessario per idratare il legante, tanto maggiore è il volume dei pori nella pasta di cemento.

Con l'aumento del rapporto a/c aumentano anche i tempi di stagionatura necessari perché, nella pasta cementizia, si interrompa la continuità dei pori capillari. Dalla Tabella 6 si rileva che, con un rapporto $a/c = 0,40$, ed una temperatura ambiente pari a 20°C , occorrono circa 3 giorni, mentre con un rapporto $a/c = 0,70$ occorre un anno.

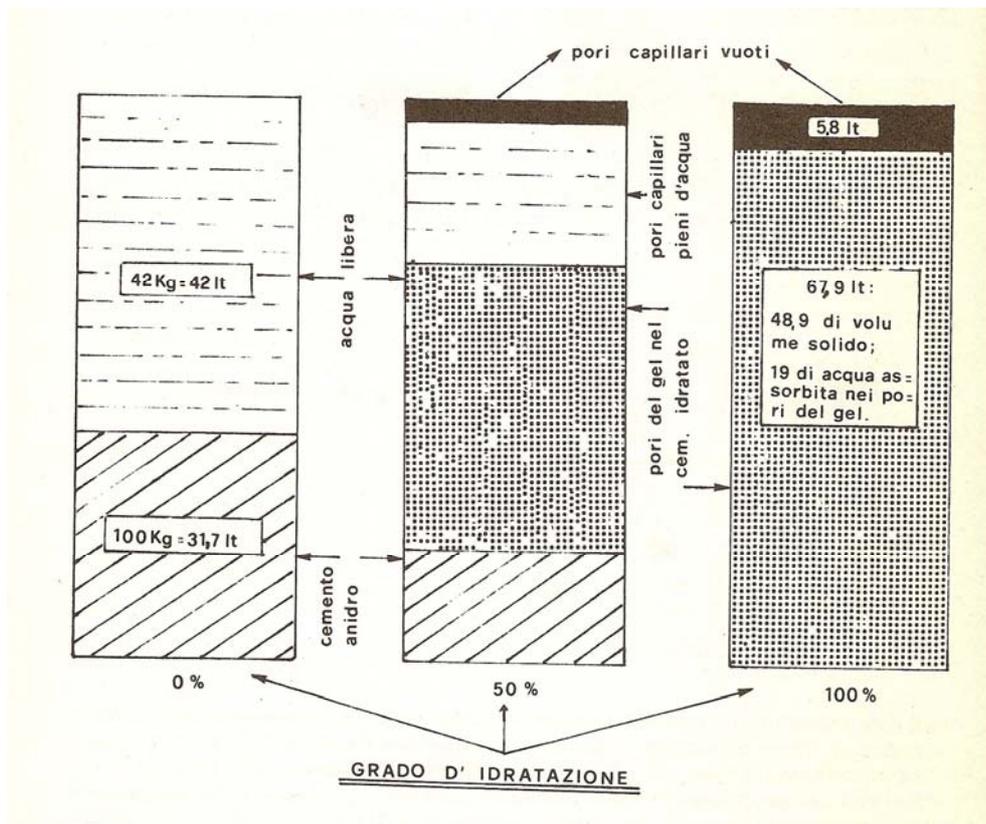


Figura 4 - Acqua necessaria per idratare 100 kg di cemento

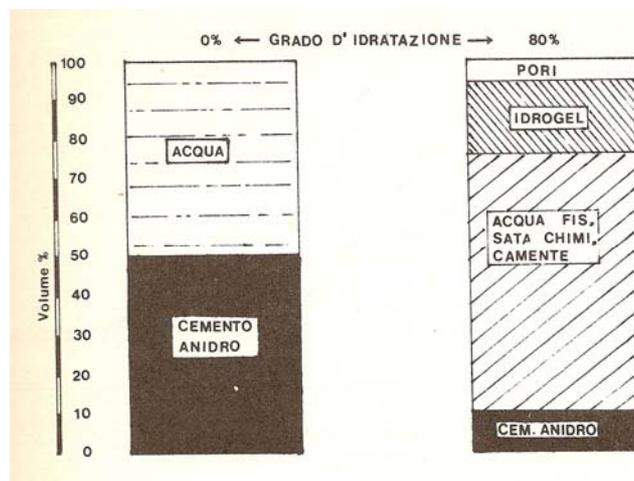


Figura 5 - Rappresentazione schematica di una pasta cementizia con $a/c = 0,32$, in diversi stadi dell'idratazione. Rapporto volumetrico acqua:cemento = 50:50

Rapporto a/c	Tempi di stagionatura
0,40	3 giorni
0,45	5 giorni
0,50	2 settimane
0,60	6 mesi
0,70	1 anno
> 0,70	impossibile

Tabella 6 - Valori del rapporto a/c e del tempo di stagionatura in corrispondenza del quale si interrompe la continuità dei pori capillari.

Presa ed indurimento della pasta cementizia

Quando il cemento è impastato con l'acqua si osserva che apparentemente non succede nulla e che successivamente si producono delle reazioni, il cui decorso, relativamente rapido, provoca la solidificazione della massa.

In realtà si è dimostrato che non appena si aggiunge acqua, avvengono reazioni anche violente, tanto che già dopo pochi minuti l'acqua è saturata di idrato di calcio, il trisilicato passa in soluzione ed in essa viene subito disgregato, mentre la parte di idrato di calcio resasi libera cristallizza gradualmente la sua soluzione. L'acqua, inoltre, assorbe quantitativi elevati di alcali dai granuli del cemento, mentre gli alluminati che passano in soluzione precipitano dalla parte di gesso, che pure si scioglie sotto forma di solfo alluminato di calcio insolubile (ettringite). Questi processi provocano rapidamente un aumento della viscosità della pasta (inizio della presa del cemento), la cui lavorabilità resta di poco diminuita, tanto che l'irrigidimento può essere nuovamente eliminato per mezzo di una lavorazione meccanica. Questo fenomeno di tixotropia si rileva nei sistemi colloidali acquosi, fintanto che la parte colloidale sia presente in scarsa concentrazione.

Il periodo di mantenimento della lavorabilità della pasta cementizia viene determinato per mezzo dell'ago di Vicat e la sua conoscenza è molto importante, per sapere quanto sia il tempo che il Produttore ha a disposizione per confezionare la miscela, trasportarla, metterla in opera e compattarla razionalmente. Con il proseguimento della presa, la viscosità aumenta fino a quando la pasta non è più deformabile. La determinazione di questo valore, calcolato a partire dall'istante in cui è aggiunta l'acqua, viene indicato come tempo di fine presa.

I tempi d'inizio e fine presa della pasta cementizia si rilevano secondo il metodo di Vicat, il cui principio prevede la penetrazione di un ago standardizzato nella pasta; l'ago di Vicat si può attivare sia manualmente che automaticamente e in questo caso gli andamenti dei tempi sono rappresentati graficamente. Finita la presa ha inizio la fase di indurimento progressivo della pasta, cioè il raggiungimento di una resistenza sempre maggiore ai carichi; il fenomeno è riconducibile essenzialmente a due cause:

- ✚ alla presenza, nel cemento, del silicato bicalcico che si idrata molto lentamente;
- ✚ alla formazione degli idrosilicati di calcio gelatinosi che avvolgono i granuli, rendendone sempre più lenta l'idratazione in profondità.

Il fenomeno d'indurimento ha un andamento rapido nei primi 28 giorni, per proseguire lentamente nel tempo, tanto che dopo 10 anni non ha ancora raggiunto il suo valore massimo.

La presa e l'indurimento, pur essendo due manifestazioni di uno stesso fenomeno, sono comunque da ritenersi indipendenti, al punto che si possono avere cementi a lenta presa e rapido indurimento o viceversa.

La velocità della presa e dell'indurimento dipendono da diversi fattori, oltre che dalla natura mineralogica del cemento, quali:

- ✚ il rapporto a/c, in quanto più elevato è il rapporto più lenti sono i fenomeni;
- ✚ la temperatura ambiente in cui avviene il processo di idratazione (il freddo rallenta i fenomeni, il calore li accelera);
- ✚ l'umidità relativa dell'ambiente di maturazione.

Calore d'idratazione

Per effetto delle reazioni chimiche che avvengono durante il processo d'idratazione, che sono di tipo esotermico, si determina uno sviluppo di calore, espresso in calorie per grammo di cemento.

Nelle costruzioni in calcestruzzo di tipo massivo, come nel caso delle dighe, il calore d'idratazione riveste un notevole interesse pratico poiché, disperdendosi soltanto attraverso le superfici delle pareti, si determina che:

- ✚ la temperatura all'interno della massa è più elevata di quella superficiale;
- ✚ l'indurimento all'interno è più rapido che in superficie a causa della superiore temperatura; da questo fenomeno deriva la contrazione della superficie, per effetto del raffreddamento più rapido e formazione di fessurazioni.

Lerch e Bogue hanno determinato i calori totali di idratazione dei singoli costituenti del cemento Portland nella seguente misura:

- | | |
|------------------------------|------------|
| ✚ per il silicato tricalcico | 120 cal/g; |
| ✚ per il silicato bicalcico | 62 cal/g; |

- ✚ per l'alluminato tricalcico 207 cal/g;
- ✚ per l'alluminato ferrite-tetracalcico 100 cal/g.

Da ciò ne consegue che i diversi componenti del clinker hanno uno sviluppo di calore differente e quindi, variando la composizione del clinker stesso, si hanno dei cementi con sviluppo di calore nettamente diversi.

Lo sviluppo del calore d'idratazione è rapido nei primi 2 ÷ 3 giorni ed assai più lento nei successivi ed il suo valore, determinato a completo sviluppo, è dell'ordine di 100 ÷ 140 cal/g, che tuttavia si riduce al 50 ÷ 75% per strutture di piccolo spessore (Figura 6).

È molto importante mettere in evidenza che:

- ✚ l'aumento del modulo dei fondenti determina l'aumento del calore d'idratazione;
- ✚ nei cementi Portland ad alto tenore di alluminato tricalcico, la finezza di macinazione non ha praticamente influenza sul calore d'idratazione;
- ✚ l'aggiunta d'inerte di polvere calcarea o di pozzolane e di loppe, determina un abbassamento della temperatura durante la presa ed un ritardo nel riscaldamento.

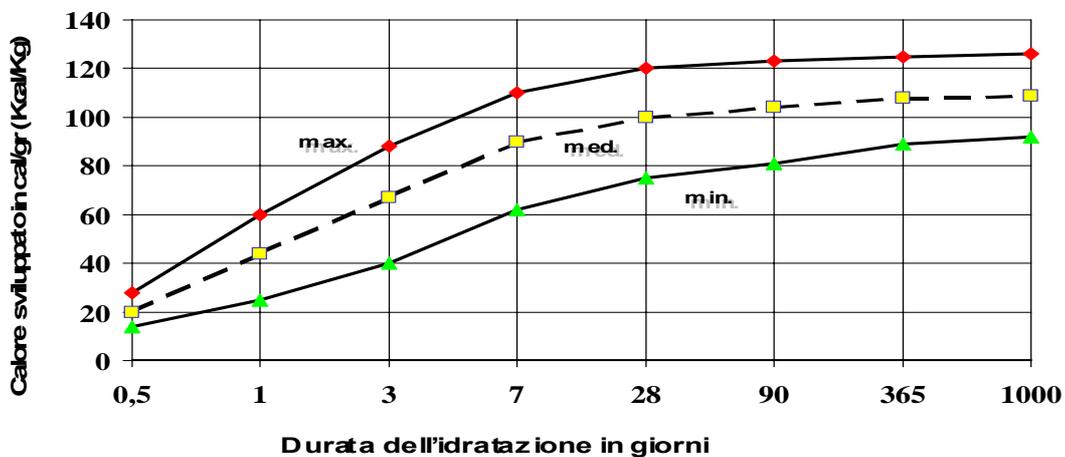


Figura 6 - Sviluppo del calore d'idratazione di un CEM I

Il ritiro igrometrico

Si è già visto che, impastando il cemento con l'acqua, il volume assoluto del cemento idrato risulta maggiore del volume assoluto del cemento anidro e tuttavia minore del volume assoluto del cemento anidro più il volume assoluto dell'acqua.

In effetti da 100 g di cemento, corrispondenti a 32 cc di volume, uniti a 40 g di acqua, corrispondenti a 40 cc, si ricavano 72 cc di pasta cementizia che, una volta indurita, risulta avere un volume pari a 66 cc, con una riduzione percentuale dell'8% circa; questo avviene in virtù del fatto che la pasta indurita non è un solido bensì un falso solido, ossia un cosiddetto solido liquido, cioè un corpo capillare simile all'argilla, sensibilissimo all'azione dell'acqua.

Quando l'acqua contenuta nei capillari si disperde, in parte per il progredire dell'idratazione ed in parte per evaporazione, la pasta cementizia si contrae e dà luogo al fenomeno del ritiro igrometrico. Questo fenomeno è di natura chimica e non deve essere confuso con le variazioni di volume che tutti i corpi subiscono al variare della temperatura.

Il ritiro igrometrico del cemento, come risulta da molteplici esperienze, è influenzato da:

- ✚ la costituzione mineralogica del cemento stesso. Il costituente che maggiormente determina il ritiro è l'alluminato tricalcico, seguito dall'alluminato bicalcico e dai silicati;
- ✚ il valore del modulo dei fondenti e del modulo silicico; in conseguenza di quanto detto al punto precedente, una diminuzione del primo modulo determina una riduzione del ritiro, mentre una riduzione del secondo il suo aumento;
- ✚ la finezza di macinazione dei cementi, nel senso che aumentando la finezza aumenta il ritiro;

- ✚ il dosaggio dell'acqua d'impasto, che cresce con l'aumentare del rapporto a/c; questo fenomeno può verificarsi anche quando, aggiungendo polveri inerti normalmente benefiche, la richiesta di acqua aumenta sensibilmente;
- ✚ l'umidità dell'ambiente di maturazione, poiché l'evaporazione dell'acqua capillare dipende da questa umidità (Figura 7).

La pasta stagionata in acqua presenta una leggera dilatazione e tuttavia, una volta prosciugata, raggiunge il medesimo ritiro di quella stagionata all'aria.

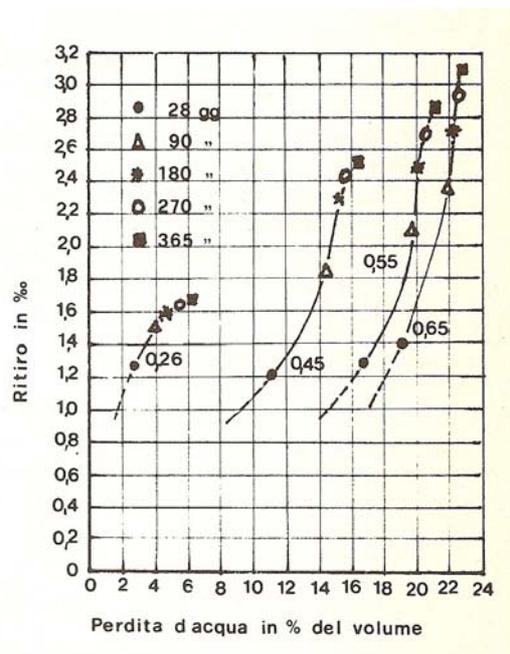


Figura 7 - Comportamento al ritiro di paste cementizie in funzione del rapporto a/c e della perdita d'acqua

Per quanto riguarda la pasta di cemento Portland, il ritiro varia da 1 a 2 mm e più al metro; invece le malte e i calcestruzzi subiscono un ritiro di $0,3 \div 0,6$ mm/m. Secondo R. E. Davis [6], il ritiro varia, non solo in funzione della natura mineralogica del cemento, ma anche in funzione della natura dell'aggregato. R. E. Davis, per provini di 3 mesi, determina i seguenti valori:

- | | | |
|------------------|------|-------|
| ✚ con l'arenaria | 0,75 | mm/m; |
| ✚ con il calcare | 0,39 | mm/m; |
| ✚ con il granito | 0,37 | mm/m; |
| ✚ con il quarzo | 0,36 | mm/m. |

Tuttavia se il provino matura in acqua, il ritiro è molto più ridotto, nell'ordine di $0,05 \div 0,1$ mm/m. Inoltre, l'aggiunta di sali o la presenza di impurità nell'acqua d'impasto aumentano sempre il ritiro, che è minimo con l'acqua distillata.

Riferimenti bibliografici

- [1] – UNI EN 197-1:1993, "Cemento: composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni".
- [2] – H. Kühl, in W. Czernin.
- [3] – Michaelis, in W. Czernin.
- [4] - Le Chatelier, in W. Czernin.
- [5] – Powers, in E. Dosaggio.
- [6] – R.E. Davis, in A. Kleinlogel.

CAPITOLO III

GLI AGGREGATI

In un conglomerato cementizio, la sabbia e la ghiaia o il pietrisco ottenuto per frantumazione di rocce, costituiscono il cosiddetto scheletro inerte, cioè l'elemento aggregato che non partecipa direttamente ai complessi fenomeni della presa e dell'indurimento del cemento.

Le rocce dalle quali si ricavano questi materiali sono suddivise, in base alla loro origine, in diverse classi che sono più o meno indicate per la produzione di granulati di buona qualità.

La maggior parte delle rocce vulcaniche sono un eccellente materiale per la produzione di aggregati, essendo normalmente dure, resistenti e di elevata densità. Tuttavia i tufi ed alcuni tipi di lave, porose per inclusioni gassose, possono fare eccezione alla regola e sono quindi inutilizzabili per il confezionamento di calcestruzzi di buona qualità, a causa del loro basso peso specifico e per l'elevato assorbimento d'acqua.

Le rocce sedimentarie sono di qualità variabile e quindi si possono avere calcari duri e densi, idonei per la produzione di aggregati, oppure arenarie friabili o calcari contenenti argille, assorbenti ed inconsistenti.

Gli scisti normalmente non sono di buona qualità, essendo deboli e assorbenti; inoltre, trovandosi in stratificazioni sottili, tendono ad assumere forme appiattite.

Le rocce silicee e la selce sono impiegate diffusamente come aggregati, ma devono essere sottoposte ad un controllo preliminare, in quanto si è osservato che la resistenza di alcune rocce di questa natura alla disintegrazione per gelo e disgelo varia in funzione del loro grado di saturazione.

Gli aggregati si dividono, a seconda delle dimensioni dei granuli, in fini o sabbie, con grandezze variabili da 0 a 4 mm ed in grossi o ghiaie e pietrischi, con dimensione diametrale sino a 40 mm ed oltre; nel caso di getti in calcestruzzo massivi si possono avere dimensioni dell'ordine di 120 ÷ 150 mm. A seconda dell'origine, si distinguono gli aggregati naturali, che si estraggono da giacimenti alluvionali o da fiumi e gli aggregati artificiali, come le scorie, le argille espanse, ecc. (Figura 8).



Figura 8 – Aggregati alluvionali naturali (sinistra) e da frantumazione (destra).

Le sabbie

Le sabbie devono possedere particolari requisiti, indipendentemente dalla granulometria.

È indispensabile accertare che non contengano sostanze argillose, miche in quantità eccessive, limi, sostanze organiche, feldspati alterati, solfati e cloruri.

Normalmente le sabbie fluviali e quelle estratte da depositi alluvionali recenti di pianura, al di sotto della falda freatica, sono esenti da argille in quanto lavate dalla circolazione dell'acqua.

Le sabbie prelevate da depositi alluvionali antichi, sono invece scarsamente idonee in quanto i singoli granuli di minerale possono trovarsi in uno stato di avanzata alterazione.

In presenza di quantità elevate di mica, a causa del disfacimento di gneiss e micascisti, è consigliabile un energico lavaggio delle sabbie con acqua dolce.

Le ghiaie ed i pietrischi

Le ghiaie e i pietrischi devono essere costituiti da elementi opportunamente vagliati e, soprattutto, provenienti da rocce che abbiano notevoli caratteristiche di resistenza e che non presentino alterazioni.

Quindi le ghiaie nelle quali siano presenti arenarie, tufi, argilloscisti, marne, calcari teneri oppure derivate da rocce gneissiche ricche di mica, con possibilità di fratture secondo piani preferenziali, sono da escludere.

Gli aggregati non si possono classificare, in assoluto, come inerti, in quanto i loro costituenti mineralogici potrebbero sviluppare una reazione con il cemento; per esempio la reazione tra gli alcali del legante e l'opale (silice idrato amorfo), presente anche in piccoli quantitativi, determina evidenti fenomeni di espansione e rapido deterioramento del calcestruzzo; in tal caso si può limitare il fenomeno con l'impiego di cementi a basso contenuto alcalino, tra lo 0,5 - 0,6% del cemento.

Le loro caratteristiche fisiche sono:

- ✚ la proprietà;
- ✚ lo stato delle superfici;
- ✚ la gelività;
- ✚ la densità apparente;
- ✚ il peso litrico o volumetrico;
- ✚ la costituzione mineralogica;
- ✚ la forma dei granuli;
- ✚ la granulometria;
- ✚ la percentuale dei vuoti;
- ✚ la superficie specifica.

Proprietà

L'aggregato utilizzato deve essere idoneo e pulito, pertanto l'eliminazione delle impurità, per mezzo di lavaggio meccanico, è di fondamentale importanza.

Stato delle superfici

Lo stato delle superfici gioca un ruolo molto importante agli effetti dell'aderenza con la pasta cementizia. È evidente che una superficie rugosa, quale si ottiene da frantumazione di rocce, offre un aggrappo migliore, mentre una superficie tondeggianti consente di raggiungere, a parità di acqua di impasto, una consistenza del calcestruzzo più fluida. Superfici troppo lisce, come nel caso di certi minerali silicei, hanno in generale effetti negativi sulle resistenze meccaniche, sul fluage ed anche sulla permeabilità del calcestruzzo.

Gelività

La gelività è una caratteristica fondamentale, che deve essere attentamente verificata prima della scelta di un giacimento da sfruttare e che dipende più dallo stato delle fessurazioni delle rocce, che dalla loro porosità assoluta.

Anche gli aggregati sani, costituiti però da rocce aventi coefficienti di dilatazione termica fortemente differenti, si possono rivelare gelivi a causa dei differenziali di espansione determinati da forti escursioni termiche. Aggregati che presentino queste caratteristiche sono da considerarsi non idonei per il confezionamento di calcestruzzi di buona qualità.

Densità apparente

La densità apparente si definisce anche come peso specifico apparente e costituisce un elemento importante nella realizzazione di opere dove sia preminente il fattore peso (quali dighe a gravità) e, in maniera meno determinante, sulle resistenze meccaniche di un calcestruzzo. Comunque è indice di una maggiore o minore porosità dell'aggregato e i valori che normalmente si riscontrano, nel caso di materiali naturali, variano da 2,55 a 2,8 kg/l.

La definizione della densità apparente, cioè del peso dell'elemento aggregato con i suoi vuoti e dei suoi capillari, è della massima importanza agli effetti di un esatto calcolo della composizione di un impasto di calcestruzzo, come si vedrà nel capitolo dedicato al proporzionamento (Figura 9).

Invece non si considera rilevante la conoscenza del peso specifico assoluto, cioè della pietra senza i vuoti capillari ed eventualmente da prendere in considerazione, nel caso si voglia determinare il volume dei vuoti dei vari elementi aggregati come rapporto tra il peso specifico assoluto ed apparente.

Il peso specifico apparente si determina, con aggregato allo stato S.S.A., acronimo di saturo con superficie asciutta, in laboratorio o in cantiere, per mezzo di un apparecchio definito Picnometro o Volumometro, oppure con un qualsiasi recipiente di volume vuoto. L'operazione è basata sulla determinazione del volume della miscela di aggregati per spostamento di un pari volume d'acqua. Utilizzando il Picnometro, si procede come segue:

- ✚ si pesa il Picnometro pieno d'acqua e si esprime il suo peso (P_i) in grammi, determinando così il volume noto;
- ✚ si pesa un quantitativo di aggregato (P_2) e si aggiunge acqua sino al livello del volume noto, dopo aver agitato il contenuto per garantire il riempimento dei vuoti e l'eliminazione delle bolle d'aria;
- ✚ si determina il volume dei vuoti (V_v) per differenza tra il peso dell'aggregato più l'acqua (P_3) ed il peso dell'aggregato (P_2);
- ✚ si determina il volume dell'aggregato (V_r) per differenza tra il volume noto del recipiente e quello dei vuoti ($P_i - V_v$);
- ✚ si determina il peso specifico apparente per divisione tra il peso dell'aggregato e il volume dell'aggregato (P_2/V_r).

Nel caso l'aggregato sia essiccato a peso costante, si deve determinare la percentuale d'acqua assorbita, che non favorisce l'idratazione del cemento; normalmente è nell'ordine dell'1% per aggregati compatti, mentre raggiunge il 3 - 4% qualora vi siano materiali particolarmente porosi.

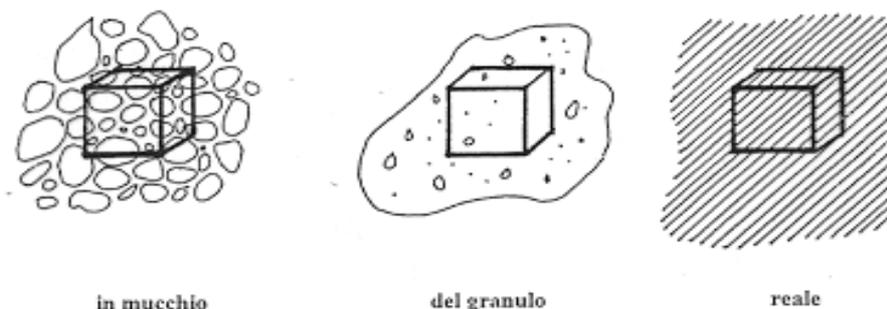


Figura 9 – I pesi specifici (densità) degli aggregati.

Peso litrico e volumetrico

Il peso litrico e volumetrico ha una notevole importanza pratica nei rapporti tra l'Utilizzatore ed il Produttore di aggregati o nel caso, oggi rarissimo, d'impiego d'impianti di confezionamento con dosaggio dei componenti a volume. Esso rappresenta il peso, espresso in chilogrammi, di un aggregato contenuto in un recipiente di volume noto, allorché venga riempito e costipato secondo speciali modalità, come ad esempio indicato dal metodo Standard C-29-42 dell'American Society for Testing Materials (ASTM). In questo caso ci si avvale di un recipiente metallico di forma cilindrica, nel quale l'aggregato viene immesso in tre strati successivi, curando di costipare ognuno di essi con 25 colpi di un pestello di ferro del diametro di 16 mm, della lunghezza di 60 mm e terminante con una testa sferica del raggio di circa 6 mm.

La determinazione del peso litrico è utile, inoltre, per calcolare, in rapporto con il peso specifico apparente, la percentuale dei vuoti contenuti in una data miscela di inerti. Si calcola con la formula:

$$\% \text{ vuoti di un aggregato} = 100 \times (\text{densità apparente} - \text{peso litrico} / \text{densità apparente}). \quad (1.3)$$

Il peso litrico si determina normalmente con aggregato definito S.S.A., saturo a superficie asciutta (Figura 10), in quanto il volume di un inerte ed in particolare delle sabbie è sensibilmente variabile in funzione della percentuale d'umidità contenuta (Figura 11).

A titolo orientativo si ricordano i seguenti pesi litrici:

- ✚ sabbia asciutta: kg/dmc 1,40÷1,80 (vuoti = 32+47%);
- ✚ sabbia bagnata: kg/dmc 1,20÷1,70 (vuoti = 36+55%);
- ✚ ghiaia asciutta: kg/dmc 1,30÷1,50 (vuoti = 44+51%);
- ✚ ghiaia bagnata: kg/dmc 1,40÷1,60 (vuoti = 40+47%).

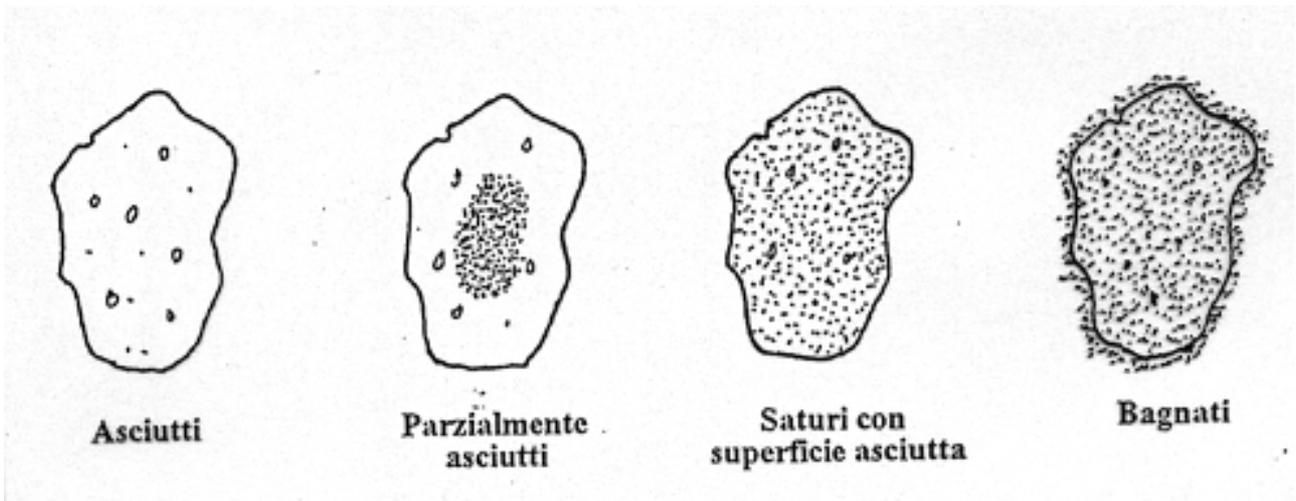


Figura 10 – I diversi stati di umidità dell'aggregato.

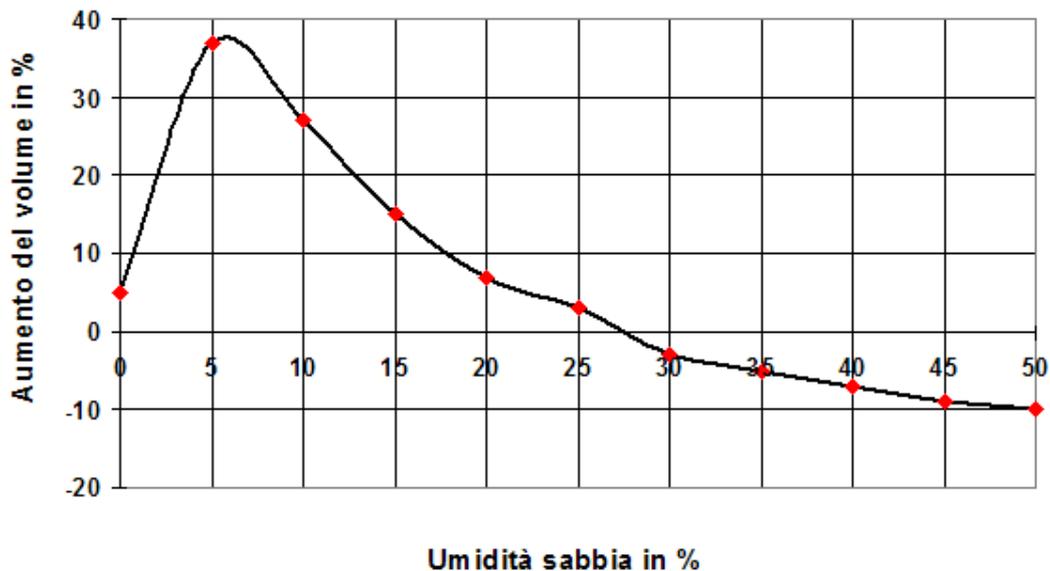


Figura 11 - Variazione del volume della sabbia in funzione della sua umidità.

Costituzione mineralogica

A proposito della costituzione mineralogica si è già indicato quali siano le caratteristiche mineralogiche degli aggregati idonei per il confezionamento di calcestruzzi di buona qualità; quelli provenienti da rocce calcaree o quarzifere e da graniti sono particolarmente raccomandati.

La principale distinzione tra questi tipi di rocce, consiste nella differente adesività della pasta di cemento e in particolare nel contenuto di cementi con alta percentuale di clinker di Portland. I fenomeni d'aderenza in un calcestruzzo sono particolarmente complessi e comprendono notoriamente forze di adesione per contatto molecolare; comunque generalmente, sembra che l'adesività del cemento con clinker di Portland (CEM I – CEM II) sia superiore con il calcare che con gli altri minerali.

Forma dei granuli

La forma dei granuli è la caratteristica dell'aggregato che svolge un ruolo determinante nel momento del confezionamento e della messa in opera di un impasto di calcestruzzo e deve essere tenuta in considerazione quando si deve determinare la più idonea composizione della loro miscela percentuale.

Il loro coefficiente di forma C (Tabella 7), che si può calcolare quando gli aggregati sono caratterizzati da una dimensione diametrale medio-grande, consente di apprezzarne più completamente la qualità. La determinazione viene fatta su almeno 15 elementi, rappresentativi di ogni classe di aggregato, come rapporto tra la sommatoria dei volumi effettivi dei granuli e la sommatoria dei volumi delle sfere circoscritte ad ogni elemento, secondo la massima dimensione, applicando la seguente formula $[C = 6\sum V/\sum \pi d^3]$ (2.3)

dove:

 V = volume effettivo di ogni elemento generico;

 d = diametro massimo di ogni elemento.

Il volume effettivo di ogni granulo si determina per mezzo di un picnometro, mentre il volume di ogni sfera circoscritta è calcolato secondo la formula $[V_c = \pi d^3/6]$. (3.3)

Forma	Ottima	Buona	Minima	Lamellare	Aghiforme
Coeff. C	0,40	0,30 – 0,40	0,15	0,07	0,01

Tabella 7 – Coefficienti di forma C dell'aggregato e loro classificazione secondo la Normativa Francese.

Qui di seguito si riporta un esempio derivato dalla analisi di un aggregato particolarmente sferoidale:

Massima dimensione diametrale dell'elemento generico: d (mm)	Volume della sfera circoscritta (cc)	Volume effettivo dello elemento generico (cc)
12	1,00	0,50
14	1,50	0,90
16	2,00	1,10
18	3,00	1,70
20	4,00	2,00
21	5,00	2,90
24	7,50	3,80
27	10,00	6,10
29	12,50	8,30
31	15,00	9,10
34	20,00	10,20
36	25,00	14,10
39	30,00	17,15
42	40,00	25,05
46	50,00	32,10
Totale	226,50	135,10

da cui: $C = 135,10/226,5 = 0,59$

(4.3)

La Normativa Francese indica la seguente classificazione degli aggregati in funzione del coefficiente di forma (Tabella 7):

- ✚ C 0,40 aggregato ottimo;
- ✚ C 0,30 ÷ 0,40 aggregato da buono a molto buono;
- ✚ C 0,20 aggregato con caratteristiche minime per granulometrie con D_{max} 15 ÷ 25 mm;
- ✚ C 0,15 aggregato con caratteristiche minime per granulometrie con D_{max} 30 ÷ 50 mm;
- ✚ C 0,07 aggregato con forma lamellare;
- ✚ $C \leq 0,01$ aggregato con forma aghiforme.

Uno scadente coefficiente di forma influisce sfavorevolmente su ogni classe di aggregato:

- ✚ la sabbia fine di forma lamellare riduce la fluidità di un impasto di calcestruzzo; da ciò ne consegue un aumento dell'acqua d'impasto, che rende necessario, per mantenere costante il rapporto a/c, l'aumento del dosaggio di cemento;
- ✚ una ghiaia aghiforme determina il confezionamento di un calcestruzzo arido, difficilmente compattabile, che presenta sovente una soglia di lavorabilità tale per cui anche lievi variazioni dell'acqua comportano la produzione di impasti con consistenze estremamente variabili.

Il coefficiente di forma C deve essere, secondo la normativa UNI EN 12620, $\geq 0,15$.

Sotto gli elementi piatti, per effetto del bleeding potrebbe svilupparsi un film di lattime di cemento o addirittura di bolle d'acqua, che subiscono, in caso di gelo, una forte espansione con conseguente formazione di lesioni nel calcestruzzo, come è stato verificato sperimentalmente da Bolomey [1].

Granulometria

Gli aggregati si possono ottenere da fiumi e depositi naturali o per frantumazione di rocce. In entrambi i casi è però indispensabile, al fine di consentirne un impiego efficace, provvedere ad una suddivisione dei granuli di diverse dimensioni in classi, per mezzo di opportuni vagli.

Il fornitore di aggregato immetterà sul mercato una serie di classi granulometriche, che si distinguono normalmente a seconda dei limiti estremi delle dimensioni diametrali dei granuli che le costituiscono. Dunque si possono avere, per esempio, sabbie naturali o da frantumazione, con granulometrie da 0 a 2 mm, da 0 a 4 mm, ecc.; ghiaietti e graniglie con granulometrie da 4 a 8 mm, da 8 a 15 mm e infine ghiaie o pietrischi con granulometrie da 15 a 30 mm, da 30 a 50 mm, ecc.

Ovviamente questi limiti sono puramente indicativi (riferirsi alle norme UNI EN 12620 ed UNI 8520) e pertanto gli aggregati sono suddivisi secondo modalità differenti che dipendono dalle attrezzature a disposizione; in effetti spesso si vendono anche dei misti, detti mistoni per calcestruzzi, che sono costituiti da una miscela naturale di sabbie, ghiaietti e ghiaie non lavorate, ma solamente lavate.

Questi assortimenti di aggregati si possono utilizzare anche per il confezionamento di impasti di calcestruzzo non armati, come i magroni, ma evidentemente non possono assicurare quella costanza di risultati, indispensabile per limitare lo scarto di produzione di una centrale, chiaramente necessaria per soddisfare le esigenze della moderna tecnologia del calcestruzzo.

Le granulometrie delle varie classi di aggregato vengono effettuate su inerte essiccato a peso costante, in forno con temperatura pari a circa 110°C, per mezzo di una operazione meccanica di vagliatura, detta normalmente setacciatura; la vagliatura utilizza una serie di setacci e crivelli normalizzati per determinare il quantitativo, ovvero il peso espresso in grammi, del materiale residuo su ogni staccio e crivello, da cui si ricava la percentuale in peso di aggregato passante attraverso le maglie od i fori. Le percentuali ottenute, vengono quindi rappresentate graficamente per mezzo di un diagramma cartesiano, avente per ascissa le aperture dei vari setacci e per ordinata le relative percentuali, in peso, dei passanti.

Il campione di aggregato da analizzare in laboratorio, deve essere rappresentativo della massa ed il suo peso deve essere tanto maggiore quanto più grande è la sua dimensione diametrale.

Orientativamente, si possono consigliare i seguenti quantitativi di aggregato da prelevare e quelli da utilizzare per la setacciatura:

Tipo di aggregato	Granulometria (mm)	Campione da prelevare in cantiere (kg)	Campione da setacciare (kg)
Sabbie	0 ÷ 2	4	1
	0 ÷ 5	5	2
Ghiaietti e pietrischetti	5 ÷ 7	5	2
	7 ÷ 12	10	3
	12 ÷ 15	15	3
	15 ÷ 25	20	4
Ghiaie e pietrischi	25 ÷ 40	30	5
	40 ÷ 50	40	5

Il campione da vagliare, ricavato dal campione prelevato, si ottiene, secondo un procedimento, detto quadripartizione, che include le seguenti operazioni:

- ✚ porre su una superficie pulita tutto il materiale prelevato ed effettuare un accurato rimescolamento;
- ✚ appiattare il mucchio e dividerlo in quattro parti eguali (quadripartizione) per mezzo di due linee ortogonali;
- ✚ allontanare i due quarti opposti diagonalmente e rimescolare i due quarti restanti;
- ✚ ripetere l'operazione di quadripartizione sino ad ottenere il campione da vagliare nella quantità voluta.

L'operazione di vagliatura viene effettuata normalmente per mezzo di apposite attrezzature, dette vibrovagli o setacciatori, che agiscono per trasmissione di vibrazioni alla colonna di setacci o per scuotitura. In entrambi i casi è opportuna una successiva vagliatura manuale, setaccio per setaccio, sino a che si rilevi passaggio di materiale.

Esistono diverse serie di setacci a maglie quadre o di crivelli a fori tondi, a seconda delle normative nazionali da cui sono derivate; qui di seguito si riportano le più diffuse:

- ✚ serie UNI, italiana, con crivelli a foro tondo e setacci a maglia quadra;
- ✚ serie A.S.T.M., americana, con setacci solamente a maglia quadra, le cui misure sono espresse in pollici per gli aggregati grossi e in mesch per gli aggregati fini;
- ✚ serie TYLER, americana, attualmente poco impiegata, con setacci solamente a maglia quadra, espressi in pollici o mesch;
- ✚ serie NF, francese, con crivelli a foro tondo e setacci a maglia quadra;
- ✚ serie DIN, tedesca, con crivelli a foro tondo e con setacci a maglia quadra;
- ✚ serie BS, inglese, con misure molto simili alla serie A.S.T.M.

Per facilitare il compito dell'operatore, si indicano in tabella 9 le relazioni tra i setacci di alcune tra le principali serie di vagli.

La granulometria degli aggregati può essere indicata anche numericamente attraverso un modulo, detto modulo di finezza (MF), che è dato dalla somma delle percentuali in peso dei residui cumulati divisi per cento (Tabella 9).

All'inizio si usavano i setacci della serie Tyler ma in seguito, estesosi il concetto di modulo di finezza, si sono impiegate anche altre serie.

Questo modulo si può quindi utilizzare per:

- ✚ avere una rapida misura della granulometria di un qualsiasi aggregato; a questo proposito si ricorda che un valore ridotto del modulo di finezza è indicativo della presenza di un aggregato fine, un modulo alto di un aggregato grosso;
- ✚ un rapido controllo tra due o più granulometrie;
- ✚ il proporzionamento di un aggregato misto, che si determina calcolando precedentemente il modulo di finezza della curva teorica di riferimento.

Serie UNI Ø dei fori (mm)	Serie A.S.T.M. in pollici	Serie A.S.T.M. Luce netta (mm)	Serie UNI lato maglia (mm)	Serie A.S.T.M. in mesch	Serie A.S.T.M. Luce netta (mm)
40,00	1,1/2	38,10	4,00	5	4,00
31,50	1,1/4	32,00	3,00	6	3,36
30,00	-	-	2,00	10	2,00
25,00	1	25,40	1,00	18	1,00
20,00	3/4	19,00	0,70	25	0,71
15,00	-	-	0,60	30	0,59
12,50	1/2	12,70	0,50	35	0,50
10,00	-	-	0,30	50	0,297
7,00	3/8	9,52	0,25	60	0,25
6,30	-	-	0,20	-	-
5,00	-	-	0,18	100	0,177
3,15	-	-	0,15	140	0,149
3,00	-	-	0,10	200	0,105
2,00	-	-	0,075	270	0,074
1,00	-	-	0,05	325	0,053

Tabella 8 – Relazione tra vagli e setacci UNI e A.S.T.M..

Ad esempio, se si hanno a disposizione un aggregato con modulo di finezza uguale a 4,50 ed un secondo con modulo di finezza uguale a 6,50 e si vuole ottenere un assortimento uguale a 5,10, i pesi incogniti X e Y delle due classi granulometriche si ottengono risolvendo un sistema di due equazioni lineari:

$$\begin{matrix} \updownarrow \\ \downarrow \end{matrix} (X/100) \times 4,50 + (Y/100) \times 6,50 = 5,10 \quad (5.3)$$

$$\begin{matrix} \updownarrow \\ \downarrow \end{matrix} X + Y = 100 \quad (6.3)$$

che risolto, fornisce il seguente risultato:

$$\begin{matrix} \updownarrow \\ \downarrow \end{matrix} X = 70\%;$$

$$\begin{matrix} \updownarrow \\ \downarrow \end{matrix} Y = 30\%;$$

ovvero il 70% del primo aggregato e il 30% del secondo.

Il concetto di modulo di finezza, introdotto da Abrams [2], veniva richiamato mediante l'impiego di una serie di vagli che si avvicinavano a quelli A.S.T.M. e allegato anche alla norma UNI 7163 sul Calcestruzzo Preconfezionato, attualmente non più in vigore, sebbene fosse molto interessante e didattica.

Setacci UNI (da UNI 7163)

diametro in mm
lato maglia in mm
lato maglia in mm
lato maglia in mm

40,00
20,00
10,00
5,00
2,50
1,25
0,60
0,30
0,15

Setacci A.S.T.M.

lato maglia in mm
lato maglia in mm

38,100
19,000
9,510
4,760
2,380
1,190
0,595
0,297
0,149

Setacci UNI	Sabbia	Sabbia	Ghiaia	Ghiaia
Apertura in mm	Residuo parz. %	Residuo cumul.%	Residuo parz. %	Residuo cumul.%
Diametro 40,00				
Diametro 30,00				
Diametro 25,00			10,70	10,70
Diametro 15,00			39,30	50,00
Diametro 10,00			20,50	70,50
Diametro 7,00	5,50	5,50	18,50	89,00
Diametro 5,00	2,50	8,00	11,00	100,00
Diametro 3,00	8,50	16,50		100,00
Diametro 2,00	25,30	41,80		100,00
Diametro 1,00	18,20	60,00		100,00
L maglia 0,70	15,00	75,00		100,00
L maglia 0,50	10,00	85,00		100,00
L maglia 0,30	8,00	93,00		100,00
L maglia 0,20	5,00	98,00		100,00
L maglia 0,10	2,00	-		-
Σ residui cumulativi		482,80		1.020,20
modulo di finezza (MF)		4,82		10,20

Tabella 9 – Modulo di Finezza relativo a sabbia e ghiaia.

Tra il modulo di finezza e la curva granulometrica intercorre, inoltre, un'interessante relazione geometrica; se la curva si rappresenta graficamente con le ascisse in scala logaritmica e con l'ascissa del setaccio ASTM 100 (luce netta 0,149 mm) uguale alla metà di $\log 2$, si rileva che l'area M, posta sopra la curva granulometrica, è proporzionale al modulo di finezza e che il rapporto di proporzionalità è uguale a $100 \log 2$; pertanto due curve granulometriche di uguale area M corrispondono a due aggregati di uguale modulo di finezza. Abrams, peraltro, rileva altre proprietà di questo modulo:

- ✚ a parità di proporzione tra cemento ed aggregati, le variazioni del Modulo di Finezza riflettono le variazioni del rapporto a/c, per una stessa consistenza del calcestruzzo;
- ✚ con un modulo di finezza costante, i costituenti del calcestruzzo restano costanti per giungere ad una stessa fluidità e di conseguenza alle stesse resistenze meccaniche;
- ✚ a parità di cemento, di acqua e di dimensione massima dell'aggregato, la resistenza del calcestruzzo cresce linearmente con il modulo di finezza.

Generalmente per i calcestruzzi, si considera ottimale una sabbia che abbia una rappresentazione granulometrica compresa tra i limiti estremi di un fuso, la cui curva mediana è la curva teorica di Fuller per aggregato con diametro massimo uguale a 7 mm, espressa da:

$$P = \sqrt{d/D}, \quad (7.3)$$

dove d corrisponde al diametro massimo del singolo granulo e D al diametro massimo della classe (Figura 12).

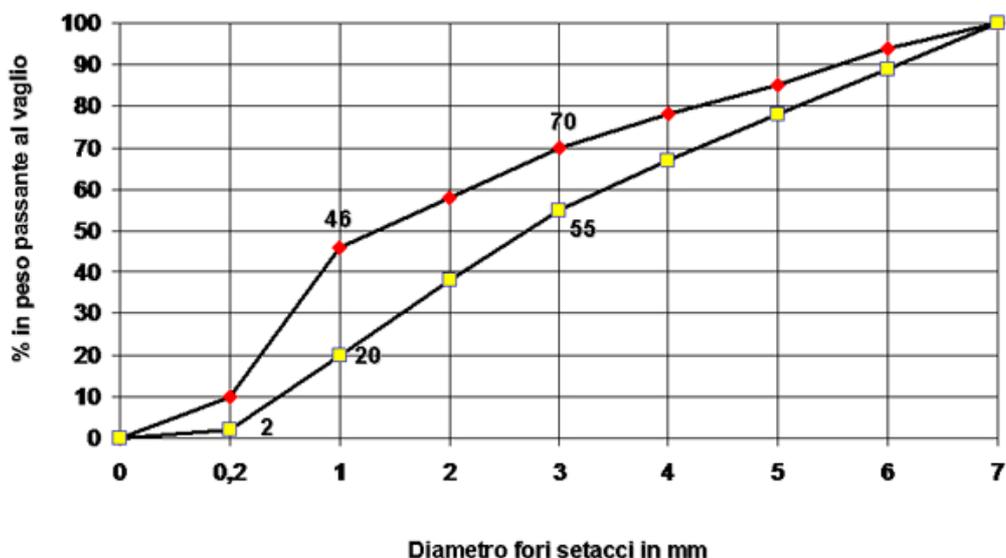


Figura 12 - Fuso teorico della sabbia per calcestruzzo.

Per quanto concerne i metodi e le curve teoriche che normalmente si utilizzano per la determinazione della migliore composizione della miscela degli aggregati, si rimanda al Capitolo VI.

Percentuale dei vuoti nell'aggregato

Tralasciando la porosità caratteristica di ogni tipo di aggregato, la percentuale dei vuoti di una determinata classe dipende dalla grossezza, forma e granulometria degli aggregati.

Secondo Abrams [2], utilizzando il modulo di finezza si può apprezzare, se non la percentuale dei vuoti, perlomeno la finezza relativa dei granuli di una miscela e dedurre l'eventuale dosaggio del cemento da adottare. Grosso modo, la percentuale dei vuoti di un aggregato asciutto con granulometria da 0 a 30 mm, considerato sciolto, varia dal 25 al 30% per inerte tondo e dal 30 al 35% per inerte frantumato. Per il confezionamento di un calcestruzzo, il volume dei vuoti più importante è quello determinato dopo la vibrazione degli aggregati, variabile dal 15 al 25% circa, a seconda della forma e distribuzione dei granuli e della loro dimensione massima.

In realtà, il quantitativo di pasta di cemento che viene utilizzato, deve superare il volume dei vuoti da riempire in quanto, al momento della messa in opera di un impasto di calcestruzzo e in particolare per procedimenti speciali, come ad esempio Prepacked Concrete, uno spessore più o meno sottile di pasta di cemento si deve interporre tra i grani, agendo da elemento lubrificante. Lo spessore di questo film dipende dallo stato superficiale dei granuli, dalla finezza di macinazione e dal dosaggio di cemento, dal rapporto a/c e dall'intensità di vibrazione.

Attualmente non è valutabile l'ammontare di questo surplus di cemento, che si determina sperimentalmente in laboratorio, a seconda del lavoro da realizzare.

Superficie specifica degli aggregati

La superficie specifica degli aggregati è una caratteristica fondamentale, a causa della sua stretta correlazione con il dosaggio di cemento necessario per assicurare il completo avvolgimento di tutti i granuli. Infatti è noto che, per legare un impasto a granulometria fine, si deve utilizzare un dosaggio di cemento superiore a quello richiesto per un impasto a granulometria grossa.

Nella tabella 27 riportiamo, a titolo orientativo, le superfici specifiche corrispondenti a diverse classi granulometriche, a forma tonda o frantumata.

Frazione (mm)	Tondi	Frantumati
	Superficie specifica (mq/kg)	Superficie specifica (mq/kg)
0,01 - 0,1	80,00	100,00
0,1 - 0,15	28,20	37,70
0,15 - 0,25	17,50	23,40
0,25 - 0,5	9,80	13,10
0,5 - 1,0	4,60	6,20
1,0 - 2,0	2,30	3,10
2,0 - 4,0	1,15	1,60
4,0 - 8,0	0,58	0,77
8,0 - 15,0	0,31	0,40
15,0 - 30,0	0,16	0,21
30,0 - 60,0	0,08	0,11
60,0 - 120,0	0,04	0,05

Tabella 10 - Superfici specifiche per aggregati tondi e frantumati.

A proposito dei valori delle superfici specifiche sopra indicate, si devono fare alcune considerazioni:

- ✚ la superficie specifica sviluppata dai grani delle sabbie, da 0 a 5 mm, è determinante in quanto per le altre classi lo sviluppo è limitato;
- ✚ per aggregati con forma particolarmente sfavorevole, le superfici specifiche riportate in Tabella 10 si devono moltiplicare per un coefficiente variabile da 1,5 a 2 nei casi estremi.

Contenuto di sostanze fini, limo-argillose e di impurità organiche

Per concludere si ricorda che la norma UNI 8520-2:2005, nella seconda parte, fornisce limiti e modalità d'analisi per la valutazione del contenuto d'impurità potenzialmente nocive, come per esempio il contenuto di polveri, di sostanze limo argillose e organiche limo-argillose. Queste analisi sono fondamentali, dal momento che la loro presenza può determinare diverse problematiche: dalla ridotta adesione con la pasta di cemento, alle variazioni dei tempi d'inizio e fine presa, sino a fenomeni d'espansione tali da portare, nei casi più eclatanti, alla disgregazione del calcestruzzo indurito.

Riferimenti bibliografici

[1] – Bolomey, in R. L'Hermite.

[2] – Abrams, in E. Dosaggio.

CAPITOLO IV

L' ACQUA D'IMPASTO

Caratteristiche

In questo capitolo, si prende in considerazione l'acqua d'impasto e le qualità alle quali deve rispondere, in particolare dal punto di vista chimico; invece per quanto concerne i rapporti con il cemento e il suo proporzionamento nell'impasto di calcestruzzo, si rimanda al Capitolo VII.

La norma UNI 7163 "Calcestruzzo preconfezionato", attualmente ritirata, indicava al punto 5.2.3.

“praticamente tutte le acque naturali normali possono essere utilizzate come acque d'impasto per calcestruzzi. È ammesso l'uso dell'acqua di mare per impasti di calcestruzzo normale, esclusi gli impasti confezionati con cemento alluminoso e per il getto di opere in cemento armato precompresso. Sono, invece, escluse le acque di scarichi industriali e civili o contenenti sostanze che influiscono negativamente sull'indurimento del calcestruzzo, quali zuccheri, oli e grassi.

Per acque torbide è ammesso un limite di torbidità di 2 gr/l (residuo all'evaporazione); al di sopra di esso occorre una predecantazione. Per i getti di cemento armato precompresso è escluso l'uso di acque di mare, come abbiamo già detto e di acque contenenti più di 300 mg/l di cloro.

Qualora venga usata acqua calda per l'impasto, questa non dovrà superare la temperatura di 80°C, con l'avvertenza di introdurre il cemento come ultimo componente.

Occorre, di conseguenza, impiegare per il confezionamento degli impasti di calcestruzzo, acque sufficientemente pulite, tipo acqua potabile, esenti da limi in quantità dannose, da materie organiche e, soprattutto, da solfati con concentrazione superiore all'1%, in quanto possono determinare, sul calcestruzzo indurito, riduzioni delle resistenze meccaniche sino al 10% ed oltre”. Attualmente, la norma di riferimento è la UNI EN 1008 “Acqua d'impasto per il calcestruzzo”, meno esaustiva della precedente, a conferma di come venga data più importanza al contenuto d'acqua nell'impasto, piuttosto che alla sua qualità.

Altre legislazioni, di cui si riportano qui di seguito alcune brevi indicazioni a titolo informativo, indicano limiti più precisi per la loro accettazione.

Le norme francesi NF, indicano che le acque impiegate per l'impasto del calcestruzzo non devono contenere materie in sospensione né possedere una concentrazione di sali disciolti, con valori superiori a:

- ✚ impurità in sospensione 2 g/l per calcestruzzi di tipo A e B; 5 g/l per calcestruzzi di tipo C;
- ✚ sali disciolti 15 g/l per calcestruzzi di tipo A e B; 30 g/l per calcestruzzi di tipo C;
- ✚ calcestruzzi tipo A = per cementi armati ad alta resistenza;
- ✚ calcestruzzi tipo B = a bassa permeabilità per dighe, serbatoi, tubi, opere marittime, ecc;
- ✚ calcestruzzi tipo C = poco o per niente armati, per getti massivi di fondazioni, ecc.

Le precisazioni della Commissione Tedesca per il calcestruzzo armato indicano che, a partire dalle prescrizioni fornite dalla stessa commissione, in virtù delle prove effettuate su diverse acque, “l'accettazione di un'acqua di impasto deve essere determinata nei confronti di impasti per i quali si sia utilizzata acqua pura”; perciò i risultati delle resistenze a compressione devono equivalersi almeno per l'85% delle resistenze raggiunte con l'impasto testimone.

Qui di seguito si riassumono le indicazioni più significative derivate da queste prove:

- ✚ sono acque utilizzabili le acque solforose se la proporzione di SO_3 è inferiore all'1%; le acque contenenti lo 0,15% di sodio e lo 0,15% di cloruro di sodio; le acque di cave di pietra; le acque provenienti da birrerie, officine a gas e malterie; le acque di mare con meno del 3% di cloruro di calcio;
- ✚ sono acque non utilizzabili, le acque di mare con il 3,5% o più di cloruro di calcio; le acque contenenti il 3,5% o più di solfati disciolti; le acque con più del 3,5% di cloruro di sodio; le acque provenienti da colorifici e officine di galvaniche, le acque contenenti zuccheri.

Infine, prima di adottare un'acqua per il confezionamento degli impasti di calcestruzzo, occorre determinarne la durezza, dovuta alla presenza di sali alcalino-ferrosi, quali calcio e magnesio. Essa viene espressa in gradi francesi e tedeschi, in base ai mg/l di CaCO_3 contenuti e riducendo, riferiti ai relativi pesi molecolari, in equivalente CaCO_3 per gli altri sali Ca ed Mg. La durezza si distingue in temporanea, che dipende dalla presenza dei bicarbonati, e permanente, data dai nitrati, cloruri, solfati, fosfati e silicati; per quanto scritto, la durezza totale si esprime come la somma della durezza temporanea con la durezza permanente.

Generalmente per l'acqua si determina anche il valore del pH, che rappresenta il logaritmo dell'inverso della concentrazione H degli ioni idrogeno, espresso in grammi equivalenti:

$$H = 1/10^n$$

$$n = \text{pH.}$$

(1.4)

In base alla normale classificazione si ha:

-  pH = 7 acqua neutra o pura;
-  pH < 7 acqua acida per solfati, nitrati, cloruri, ecc.;
-  pH > 7 acqua alcalina per carbonati di calcio, magnesio, silicati.

CAPITOLO V

ADDITIVI ED AGGIUNTE PER IL CALCESTRUZZO

Definizioni

Lo sviluppo tecnologico delle costruzioni e le sue crescenti esigenze, hanno progressivamente richiesto al calcestruzzo non solo un miglioramento qualitativo, ma anche una notevole diversificazione delle sue caratteristiche, così da poterlo utilizzare nel miglior modo possibile nei diversi tipi di applicazione.

,In altri termini si avverte la necessità di una sempre maggiore specializzazione del conglomerato cementizio, esigenza che questo materiale può soddisfare solo entro certi limiti. I suoi normali costituenti, il cemento, gli aggregati e l'acqua, non consentono la differenziazione richiesta per poter soddisfare convenientemente le diverse esigenze, specialmente a causa dell'impossibilità, per evidenti ragioni tecnico-economiche, di una produzione "su ricetta", che tenga conto delle necessità dei singoli utenti. In poche parole, questo conferma il concetto di rigidità prestazionale del calcestruzzo, che è strettamente legata ai rapporti che condizionano la sua composizione, quindi ai rapporti acqua:cemento (a/c) e aggregato:cemento (i/c).

Per questo motivo, l'adozione di particolari sostanze hanno assunto un'importanza sempre più rilevante, dal momento che, aggiunte al calcestruzzo durante il suo confezionamento, ne modificano alcune caratteristiche, sia allo stato fresco, che indurito.

Tali sostanze si possono suddividere in additivi e aggiunte.

La norma UNI EN 206-1 definisce queste sostanze come:

- ✚ additivi, prodotti aggiunti in piccole quantità rispetto al peso del cemento, prima o durante la miscelazione, o durante un'ulteriore operazione di miscelazione, al fine di ottenere le prescritte modifiche delle normali proprietà;
- ✚ aggiunte, materiali inorganici finemente divisi che possono essere aggiunti al calcestruzzo per migliorarne talune proprietà o per ottenerne di speciali. Esistono due tipi di aggiunte: quelle quasi inerti (tipo I) e quelle pozzolaniche o ad attività idraulica latente (tipo II).

La norma fornisce ulteriori precisazioni circa il loro dosaggio minimo e massimo ed i limiti del campo di impiego: Per gli additivi, la loro quantità totale non deve superare i 50 g/kg di cemento (5%) e non deve essere minore di 2 g/kg di cemento dell'impasto (0,2%). Quantità inferiori di additivi sono consentite esclusivamente se vengono disperse in una parte dell'acqua d'impasto; la quantità di additivo liquido che supera 3 l/mc di calcestruzzo deve considerare il calcolo del rapporto a/c; le aggiunte, possono essere utilizzate nella miscela purchè in quantità tali da non determinare influenze negative sulla durabilità del calcestruzzo e da non provocare la corrosione delle armature.

In entrambi i casi dovranno venire osservate le norme o i regolamenti nazionali in vigore.

Additivi per il calcestruzzo

Gli additivi per calcestruzzo sono quelle sostanze che migliorano determinate caratteristiche, sia allo stato fresco, sia a quello indurito.

In effetti, se ben utilizzati, gli additivi consentono di modificare o di migliorare:

- ✚ la reologia del calcestruzzo stesso (migliore lavorabilità, diminuzione del bleeding e della segregabilità, ecc.);
- ✚ la presa e l'indurimento (ritardanti ed acceleranti);
- ✚ le resistenze meccaniche alle varie stagionature;
- ✚ le resistenze alle azioni fisiche (gelo), meccaniche e chimiche.

Infine il loro impiego consente di ottimizzare l'organizzazione del cantiere con una maggiore regolarità dei risultati e della qualità del calcestruzzo. Pertanto è indispensabile che i progettisti, i direttori dei lavori e gli impresari, conoscano sufficientemente bene le possibilità offerte da questi prodotti e che, sul cantiere, sia presente personale tecnicamente preparato.

Gli additivi, che sono sostanze a diversa formulazione chimica, sotto forma di polveri o di soluzioni acquose, sono classificati secondo la natura delle modificazioni che apportano al calcestruzzo.

Le direttive tedesche del 1965, per le prove sugli additivi per calcestruzzo, li classificano come:

- ✚ fluidificanti (abbreviazione: BV);
- ✚ aeranti (abbreviazione: LP);

- ✚ idrofughi (abbreviazione: DM);
- ✚ ritardanti (abbreviazione: VZ);
- ✚ acceleranti (abbreviazione: BE);
- ✚ additivi per iniezioni (abbreviazione: EH).

La classificazione americana (rapporto della commissione n. 212 dell'American Concrete Institute – ACI - del 1963) divide gli additivi in 15 gruppi, che devono rispondere alle specificazioni dell'American Society for Testing and Materials (A.S.T.M.), secondo la seguente classificazione (ASTM C 494):

- ✚ Type A: water-reducing;
- ✚ Type B: retarding;
- ✚ Type C: accelerating;
- ✚ Type D: water-reducing and retarding;
- ✚ Type E: water-reducing and accelerating;
- ✚ Type F: water-reducing, high range;
- ✚ Type G: water-reducing, high range and retarding.

A livello europeo, il CEN/TC 104/WG3 ha elaborato la norma EN 934.2 "Admixtures for concrete, mortars and grouts-concrete. Admixtures - Definitions, specifications and conformity criteria", oggi UNI EN 934-2, che fornisce indicazioni circa:

- ✚ definizioni e tipi di additivi (water-reducing/plasticizing admixtures, high range water-reducing/superplasticizing admixtures, water retaining admixtures, air-entraining admixtures, set accelerating admixtures, hardening acceleration admixtures, set retarding admixtures, water repellent admixtures);
- ✚ identificazione degli additivi;
- ✚ prestazioni;
- ✚ dosaggi;
- ✚ calcestruzzo di riferimento.

Il precedente complesso di norme UNI trattava le varie famiglie di additivi attraverso la verifica del prodotto e il controllo delle sue prestazioni nelle condizioni d'impiego. Non si basava, quindi, su una qualificazione del prodotto in relazione alla sua qualificazione, come avviene per il cemento, bensì su un confronto prestazionale con la miscela utilizzata in ogni specifico cantiere, tipico più di una prescrizione contrattuale che di una vera e propria norma di identificazione.

Ben diversa è l'impostazione della UNI EN 934-2, che si divide in due parti:

- ✚ requisiti generali, identici per ogni additivo;
- ✚ requisiti specifici, che prescrivono le prestazioni minime per ogni famiglia di additivi, che la identificano nella specifica classe di appartenenza.

La norma passa, quindi, da una valutazione del prodotto in soluzione d'impiego e con il mix di cantiere, a una vera e propria pre-qualifica dell'additivo, inteso come prodotto rispondente alle specifiche di una ben determinata famiglia e come tale utilizzabile.

Vengono fornite Definizioni Generali e Definizioni Specifiche; le prime si applicano a tutti gli additivi, le seconde chiariscono "cosa sono" le varie famiglie di additivi esaminate.

Tra le Definizioni Generali si hanno:

- ✚ identificazione, cioè la procedura per caratterizzare l'additivo e controllarne, per ogni produzione, la conformità ai requisiti d'omogeneità, colore, densità relativa, residuo secco e pH, che si verifica mediante fotografia attraverso il suo spettro I.R.;
- ✚ prestazione, cioè la capacità dell'additivo in esame, di raggiungere lo scopo per il quale è impiegato, senza effetti negativi;
- ✚ dosaggio di conformità, cioè il dosaggio dell'additivo, espresso in % sul peso del cemento, con il quale si soddisfano le prescrizioni composizionali della norma.

Le Definizioni Generali forniscono anche le indicazioni su calcestruzzi e malte di riferimento, cioè quelli da utilizzare per la verifica della rispondenza alla Norma, i cui mix design sono riportati nella UNI EN 480-1.

Le Definizioni Specifiche, oltre a fornire la descrizione di cosa è un additivo per calcestruzzo, come "materiali aggiunti durante il processo di miscelazione del calcestruzzo, in quantità non superiore al 5% in peso sul peso del cemento, per modificarne positivamente le proprietà, allo stato fresco e/o indurito", definiscono anche le caratteristiche delle varie famiglie oggetto della norma stessa:

- + riduttore d'acqua/fluidificante;
- + riduttore d'acqua di alta efficacia/ superfluidificante;
- + ritentore d'acqua;
- + aerante;
- + accelerante di presa;
- + accelerante d'indurimento;
- + ritardante di presa;
- + impermeabilizzante.

I Requisiti Generali sono riportati nella Tabella della Norma, mentre quelli Specifici nella Tabelle da 2 a 9 del relativo capitolo.

Tra le varie indicazioni, il capitolo relativo ai requisiti di conformità dei fluidificanti e dei superfluidificanti, riassunti nelle Tabelle 11 e 12 riportate qui di seguito, merita ulteriori precisazioni,

Tipo di additivo	Riduttore dell'acqua fluidificante
Contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco	Non superiore del 2% rispetto al calcestruzzo testimone
Riduzione d'acqua	≥5% rispetto al calcestruzzo testimone a parità di consistenza

Tabella 11 - Requisiti di conformità da UNI EN 934-2 per fluidificante.

Tipo di additivo	Riduttore d'acqua ad alta prestazione
Contenuto di aria nel calcestruzzo fresco	Non superiore del 2% rispetto al calcestruzzo testimone, a parità di consistenza
Riduzione d'acqua	≥ 12% rispetto al calcestruzzo testimone, a parità di consistenza
Incremento della fluidità	Aumento dello slump ≥ 120 mm, rispetto allo slump di 70 +/- 10 mm del calcestruzzo testimone
Mantenimento della fluidità	Dopo 30' dall'aggiunta dell'additivo, la fluidità non deve essere inferiore a quella iniziale del calcestruzzo testimone
Resistenza alla compressione	Per un riduttore d'acqua ad alta prestazione : ad un giorno almeno il 140% e a 28 giorni almeno il 115% della resistenza del calcestruzzo testimone, a pari consistenza. Per superfluidificante: almeno il 90% della resistenza del calcestruzzo testimone, a 28 giorni, a parità di rapporto a/c

Tabella 12 - Requisiti di conformità di UNI EN 934-2 per superfluidificante.

Rilevante è la parte che fornisce prescrizioni circa il calcestruzzo di riferimento (laboratorio), per quanto riguarda il tipo di cemento, il fuso granulometrico, il mix-design e la procedura di miscelazione (Tabella 13).

Cemento	Tipo I - Classe 42.5 C₃A:7-11%; Blaine: 3200-4000 cmq/g	
Fuso granulometrico	mm	% Pass
	31,5	< 100
	16,0	80 - 100
	8,0	55 - 70
	4,0	40 - 50
	2,0	30 - 40
	1,0	20 - 30
	0,5	10 - 20
	0,25	3 - 8
	0,125	< 3
Mix design	Cemento: 350 ± 5 kg/mc Slump : 70 ± 10 mm	
Procedura di miscelazione	Utilizzare un mescolatore forzato (50% della capacità) a) aggiungere aggregati secchi; b) aggiungere ½ acqua d'impasto e miscelare per 2'; c) fermare per 2', aggiungere il cemento; d) miscelare per 30"; e) aggiungere il rimanente dell'acqua + additivo dopo 30"; f) miscelare per ulteriori 2'.	

Tabella 13 - Procedura di valutazione dei requisiti di accettazione di additivi fluidificanti e superfluidificanti con calcestruzzo di riferimento, secondo UNI EN 934-2 e UNI EN 480-1.

Le principali definizioni, che si aggiungono a quelle fornite dalle norme, sono:

- ✚ additivi fluidificanti, ovvero sostanze che, riducendo la forza di attrazione delle particelle del cemento, aumentano la fluidità degli impasti concedendo, per una determinata consistenza, una riduzione della quantità d'acqua d'impasto;
- ✚ additivi superfluidificanti, ovvero sostanze che aumentano sensibilmente la fluidità degli impasti e consentono, per una determinata consistenza degli stessi, una notevole riduzione della quantità d'acqua d'impasto;
- ✚ additivi aeranti, ovvero sostanze che provocano, nell'impasto di malta o calcestruzzo, la formazione di minute bollicine d'aria, uniformemente distribuite nella massa, allo scopo di accrescerne la resistenza al gelo e modificarne la lavorabilità e coesione;
- ✚ additivi ritardanti, ovvero sostanze che riducono la velocità iniziale delle reazioni tra il legante e l'acqua, aumentando il tempo necessario, alle malte o calcestruzzi, per passare dallo stato plastico a quello rigido, senza influenzare il successivo sviluppo delle resistenze meccaniche;
- ✚ additivi acceleranti, ovvero sostanze che, aumentando la velocità delle reazioni iniziali tra il legante e l'acqua, accelerano lo sviluppo delle resistenze delle malte e dei calcestruzzi, senza pregiudizio sulle resistenze finali. Non sono considerati gli unici acceleranti di presa;
- ✚ additivi fluidificanti-aeranti, fluidificanti-ritardanti, fluidificanti-acceleranti, ovvero sostanze che abbinano, ad un effetto tipico del fluidificante, un'azione specifica di inglobamento d'aria o di ritardo della presa del cemento od accelerazione dell'indurimento;
- ✚ additivi antigelo, sostanze che abbassano il punto di congelamento dell'acqua d'impasto e accelerano, alle basse temperature, i processi di presa e d'indurimento degli impasti cementizi, facilitandone l'impiego.

Additivi fluidificanti e superfluidificanti

Si è già visto precedentemente, come la fluidità di un calcestruzzo sia funzione della sua composizione, cioè del rapporto tra il legante e l'acqua d'impasto, che insieme costituiscono la pasta di cemento, e del rapporto tra la pasta cementizia e gli aggregati. In pratica, poichè normalmente per il proporzionamento degli aggregati si utilizza una curva granulometrica di massima compattezza, le variazioni di fluidità dell'impasto di calcestruzzo sono dovute solamente a modifiche apportate alla quantità della pasta cementizia o alla sua viscosità e quindi alla proporzione acqua:cemento (rapporto a/c) o ai due elementi contemporaneamente.

I fluidificanti riduttori d'acqua, a viscosità uguale a quella della pasta di cemento, permettono di diminuire il rapporto a/c e di conseguenza di incrementare sensibilmente le resistenze meccaniche del calcestruzzo indurito (Figura 13).

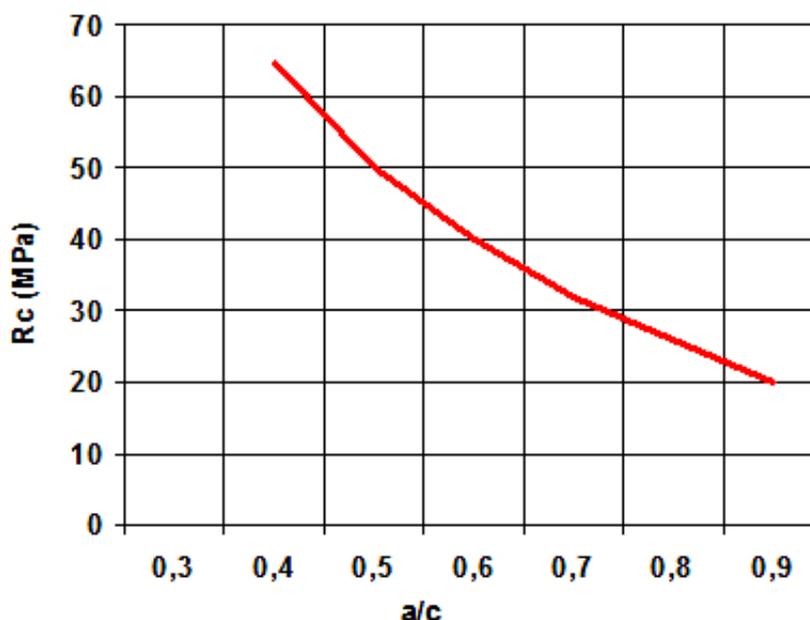


Figura 13 – Influenza di a/c sulla resistenza a compressione del calcestruzzo.

Gli additivi fluidificanti sono dei tensioattivi che formano, intorno ai granuli di cemento, delle pellicole orientate le quali, per facilitare lo scorrimento dei grani gli uni sugli altri, agiscono in tre modi:

- ✚ effetto deflocculante, dovuto al fatto che la pellicola conferisce ai micrograni la stessa polarità, di segno negativo in quanto si tratta di prodotti anionici; per questo essi tendono a respingersi gli uni dagli altri (Figura 14);
- ✚ effetto lubrificante, al contatto tra le superfici;
- ✚ effetto di bloccaggio momentaneo della diffusione della calce, che quindi consente di mantenere per più tempo l'impasto allo stato fluido.

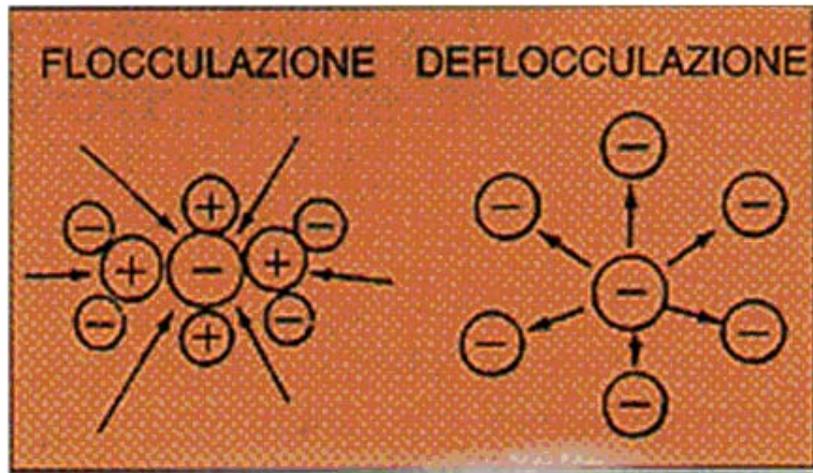


Figura 14 - Effetto flocculante (attrazione per polarità opposte) e deflocculante (repulsione per polarità identiche).

L'effetto antiflocculante e disperdente dei fluidificanti, emerge dall'esame di una sospensione di cemento effettuato con l'ultra-microscopio (Figura 15), tanto da rilevarsi un accrescimento del moto browniano, indicativo di un aumento del numero delle particelle fini.

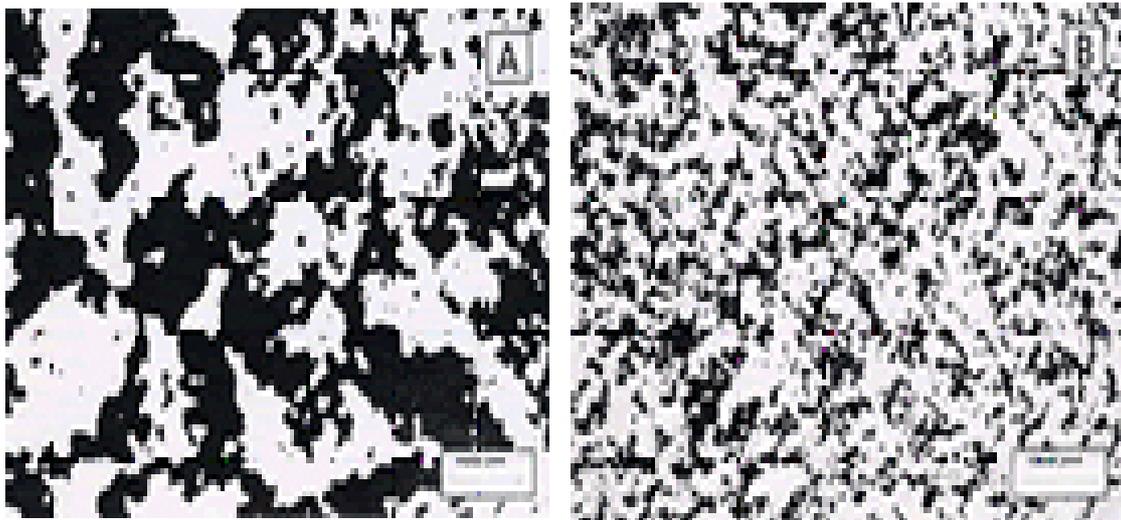


Figura 15 – Flocculazione (A) e deflocculazione (B) del cemento per effetto dei fluidificanti/superfluidificanti.

I miglioramenti prodotti dall'impiego di fluidificanti nel calcestruzzo sono essenzialmente:

- ✚ allo stato fresco, sensibile aumento della fluidità a parità d'acqua d'impasto o sentita riduzione del rapporto a/c, a parità di consistenza, rispetto ad un calcestruzzo non additivato; riduzione dell'affioramento dell'acqua d'impasto in eccesso, o bleeding, a pari consistenza e sempre rispetto ad un calcestruzzo non additivato;
- ✚ allo stato indurito, per effetto della riduzione dell'acqua d'impasto, un sensibile incremento delle resistenze meccaniche alle varie stagionature (Figura 16); il miglioramento delle caratteristiche di permeabilità (Figura 17) e della resistenza alle degradazioni dovute ad azioni chimiche e fisiche; la riduzione dei fenomeni di ritiro e fluage.

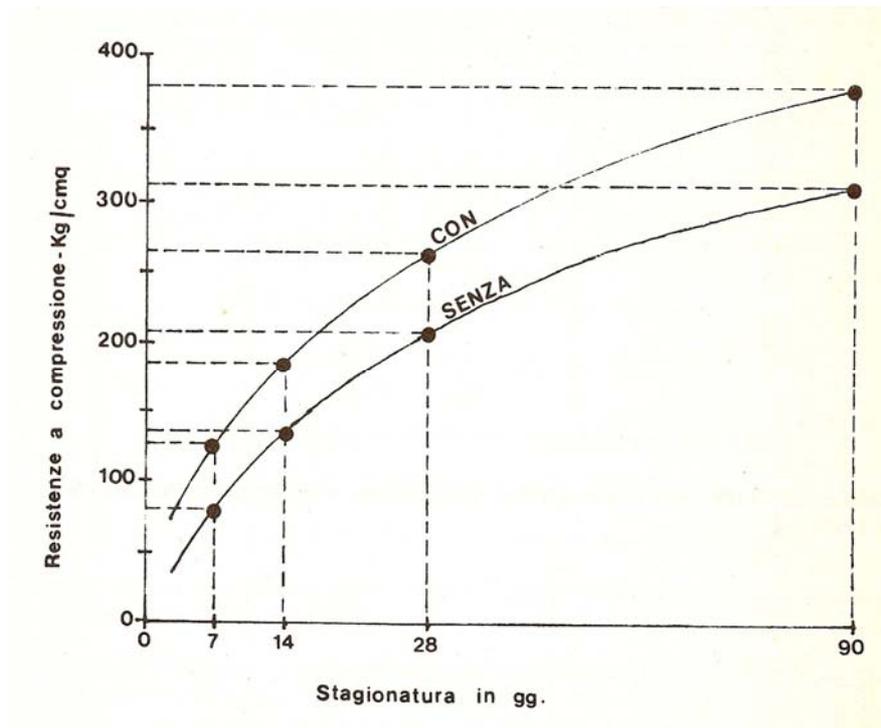


Figura 16 - Aumento delle resistenze meccaniche, alle varie stagionature, di un calcestruzzo additivato con fluidificante, rispetto ad un testimone non additivato

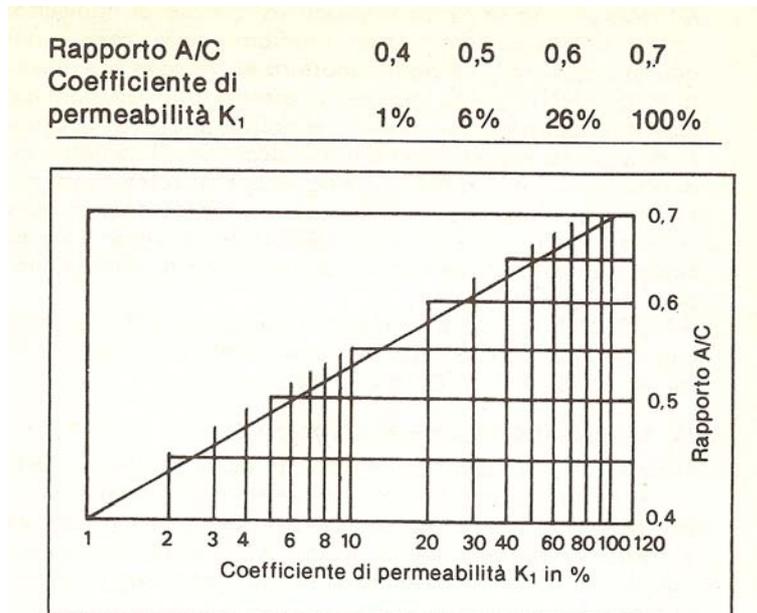


Figura 17 - Coefficiente di permeabilità K_1 in %, in funzione del rapporto a/c

Per quanto detto poco prima, risulta chiaro che l'impiego di un additivo fluidificante in fase d'esecuzione del lavoro consente:

- ✚ il miglioramento della mescolazione e della distribuzione del cemento nell'impasto;
- ✚ una minore segregabilità del calcestruzzo durante il trasporto e la messa in opera;
- ✚ la facilità di messa in opera del conglomerato cementizio a mezzo di pompe;
- ✚ il miglioramento del faccia vista.

Le basi chimiche più comunemente impiegate per la loro produzione sono il ligninsulfonato e gli acidi poli-idrossico carbonici; il loro dosaggio d'impiego, nelle normali concentrazioni di fornitura, varia tra lo 0,2 e lo 0,5% sul peso del cemento. Incrementando la loro quantità, generalmente si verifica un allungamento dei tempi di presa ed un rallentamento dell'indurimento del legante, con possibile aumento indesiderato della percentuale d'aria inglobata. Per ovviare il rischio di decadimento delle caratteristiche del conglomerato indurito, a causa dell'evaporazione dell'acqua, è necessario, in questi casi, assicurare l'estensione della protezione umida del calcestruzzo dopo il getto.

I limiti d'impiego di questa categoria di prodotti, ancora oggi utilizzata per la produzione di calcestruzzi normali o per getti massivi, ha portato all'elaborazione, già dagli anni '60 e con pieno sviluppo a partire dal 1970, della famiglia di additivi più diffusa, in particolare sul mercato italiano, quella dei **SUPERFLUIDIFICANTI**.

Essenzialmente un additivo superfluidificante è una sostanza chimica, normalmente costituita da resine sintetiche idrosolubili che aggiunta al calcestruzzo base:

- ✚ produce un incremento della classe di consistenza straordinariamente elevato;
- ✚ consente la lavorazione, a parità di consistenza rispetto al calcestruzzo non additivato, con quantità anche molto ridotte di acqua d'impasto.

I superfluidificanti, per la loro struttura chimica, possono essere aggiunti in dosi massicce, senza che ne derivino gli effetti collaterali tipici dei fluidificanti.

Di seguito si riporta in modo schematico la differenza tra queste due famiglie di additivi e in particolare in riferimento alla loro influenza sulla lavorabilità del calcestruzzo (Figura 18).

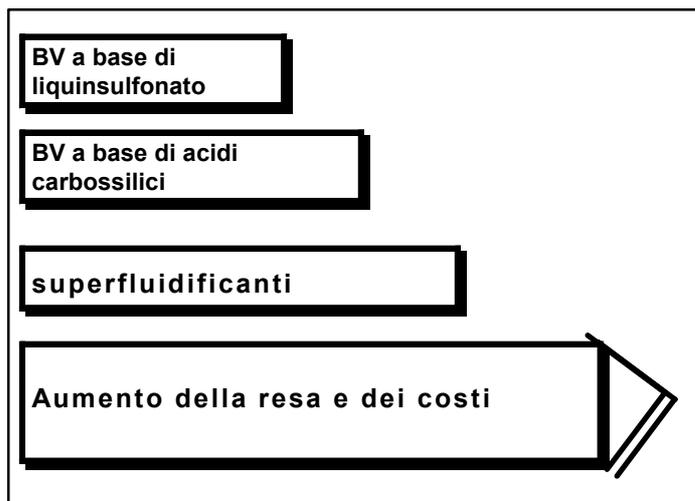


Figura 18 - Rappresentazione schematica del rapporto costo:prestazioni tra additivi fluidificanti e superfluidificanti.

La tecnologia d'impiego dei superfluidificanti consente pertanto di confezionare:

- ✚ calcestruzzi superfluidi (classi di consistenza S4 e S5, secondo UNI EN 206-1) senza apprezzabili fenomeni di segregazione; non devono inglobare aria in eccesso, nè determinare ritardi di presa non richiesti;
- ✚ calcestruzzi facilmente lavorabili, caratterizzati da ridotti e/o ridottissimi rapporti a/c, sino a circa 0,32, mantenendo inoltre la fluidità per il giusto tempo..

In linea di massima si possono suddividere in due categorie, quella dei superfluidificanti tradizionali, e quella dei prodotti di ultima generazione.

Le basi attive dei prodotti tradizionali sono, normalmente:

- ✚ condensati di melammina in formaldeide sulfonati;
- ✚ condensati di naftalene in formaldeide sulfonati .

Molto più efficaci sono i superfluidificanti di ultima generazione, a base di polimeri acrilici o di esteri polistearici modificati (Figura 19), la cui entrata nel mercato ha consentito la realizzazione

d'importanti soluzioni evolutive del calcestruzzo, la più importante delle quali è la produzione dell'autocompattante, noto come SCC - Self Compacting Concrete.

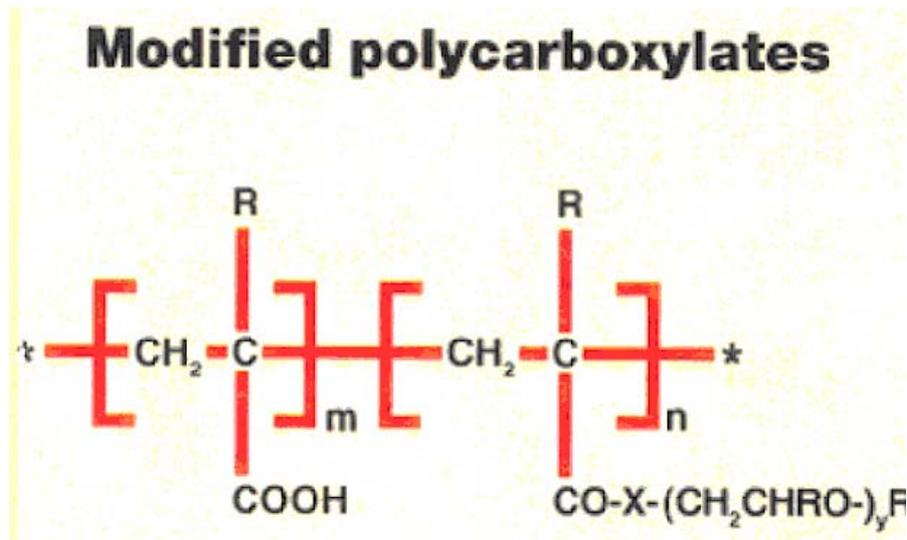


Figura 19 - Schema della struttura di un estere polistearico modificato, definito anche acrilico.

La possibile riduzione del rapporto a/c sul calcestruzzo indurito determina, oltre ad un sensibile incremento delle resistenze meccaniche, una forte riduzione del fluage, fattore particolarmente importante per il calcolo e la realizzazione di elementi in cemento armato precompresso, del ritiro, nonché della permeabilità all'acqua.

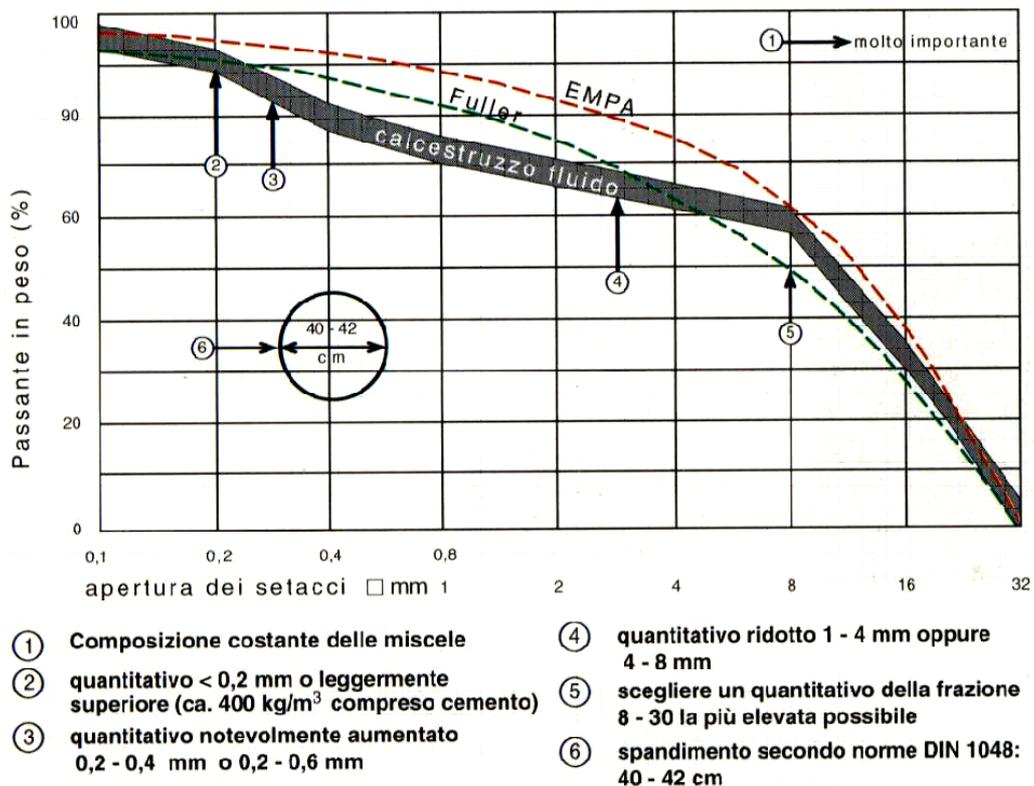


Figura 20 - Criteri per la composizione granulometrica di un calcestruzzo superfluido.

La condizione basilare per ottimizzare l'impiego di un superfluidificante è un accurato studio granulometrico, con particolare riferimento al finissimo (passante < 0,2 mm + cemento), onde evitare dannosi fenomeni di segregazione dell'impasto (Figura 20).

In linea di massima, per un aggregato con D_{max} pari a 32 mm, si consiglia un contenuto di finissimo di almeno 400 kg/mc; invece per un aggregato con D_{max} pari a 20 mm lo stesso contenuto di finissimo deve giungere ad almeno 470 kg/mc.

Con un dosaggio di cemento di almeno 280 kg/mc, si deve utilizzare il 25-35% di sabbia 0 ÷ 1 mm, mentre con un dosaggio inferiore si deve impiegare almeno il 35% della stessa sabbia. Per il confezionamento di calcestruzzi autolivellanti è comunque opportuno l'impiego d'inerti tondeggianti, anzichè di frantumazione.

Inoltre il superfluidificante si aggiunge preferibilmente all'impasto di calcestruzzo già idratato, con valori compresi nel 0,5 ÷ 1,5% rispetto al peso del cemento equivalenti a 0,5 ÷ 1,5 kg di prodotto per ogni 100 kg di legante. Il suo impiego consente, oltre agli incrementi di qualità già descritti, il confezionamento di calcestruzzi che possono soddisfare, con limitati costi di produzione e di messa in opera, le diverse esigenze che si presentano nella progettazione e nella realizzazione di costruzioni civili ed industriali, con un'aggiornata concezione tecnologica (Figura 21). Questo vale, in particolare, nel caso di strutture snelle, fortemente armate, a ridotta permeabilità e, di conseguenza, durevoli nel tempo di vita utile progettato (Figura 22).



Figura 21 – Messa in opera di calcestruzzo superfluido in strutture fortemente armate (da Archivio ASSIAD).

Comunque i campi d'applicazione dei superfluidificanti sono ben identificati e si possono riassumere in:

- ✚ riduzione dell'acqua = aumento della resistenza meccanica, riduzione della permeabilità del calcestruzzo indurito e conseguentemente miglioramento delle sue caratteristiche di durabilità;
- ✚ riduzione dell'acqua e del cemento = mantenimento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo additivato rispetto a quello in bianco, con miglioramento del comportamento in relazione agli effetti del ritiro igrometrico e del fluage, nonché minor costo globale del prodotto finito;
- ✚ incremento della classe di consistenza, a parità d'acqua rispetto ad un calcestruzzo testimone asciutto = minor costo di messa in opera, pompaggio più facile, aumento dell'affidabilità del calcestruzzo indurito.

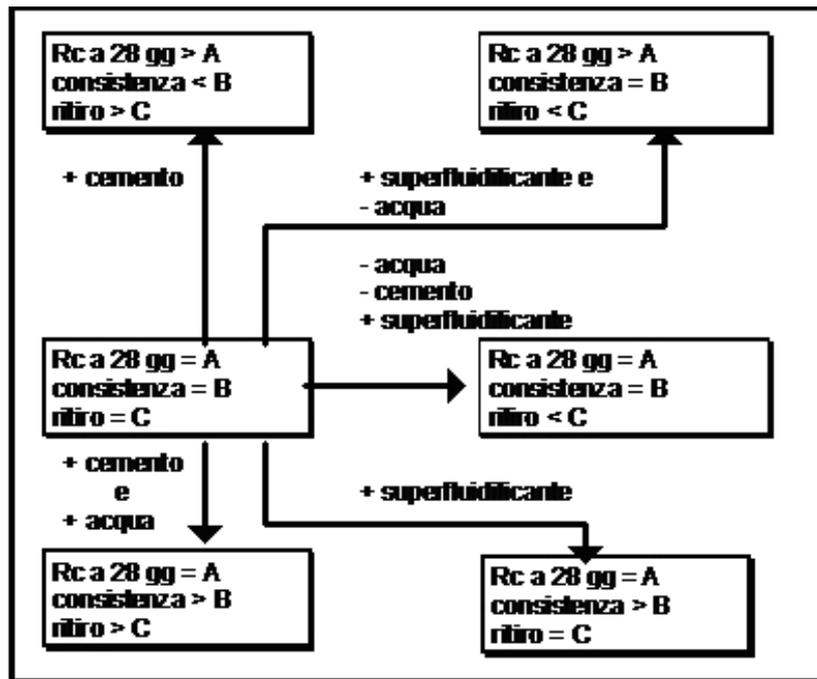


Figura 22 - Campi di applicazione ed effetti dei superfluidificanti.

Il superfluidificante deve essere considerato un prodotto migliorativo delle prestazioni del calcestruzzo e non solo un mezzo d'opera per ridurre i costi di produzione.

Solo se visto con quest'ottica, il Confezionatore assume tutti gli accorgimenti indispensabili ad un corretto impiego del prodotto e quindi:

- ✚ studia il corretto mix-design del calcestruzzo;
- ✚ utilizza il corretto tipo di additivo, secondo le prescrizioni del fornitore o le verifiche con prove preliminari;
- ✚ valuta le condizioni ambientali e la durata dei tempi di trasporto e di messa in opera del calcestruzzo, al fine di produrlo con la fluidità iniziale necessaria per garantirne la lavorabilità, senza ulteriori e nocive aggiunte d'acqua.

Ulteriori considerazioni sull'utilità di questa categoria di additivi, sono strettamente legate all'importanza del contenimento del rapporto a/c e alla porosità della pasta di cemento indurita (Figura 23), conseguentemente alla sua permeabilità, come requisito fondamentale per la durabilità.

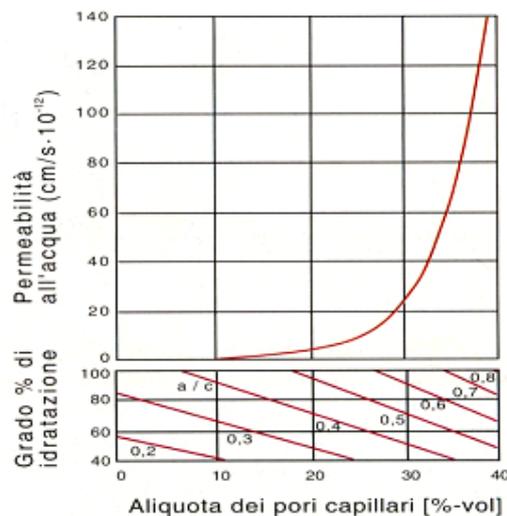


Figura 23 – Correlazione tra a/c, grado di idratazione, aliquota di pori capillari e permeabilità della pasta di cemento.

Nel gruppo dei fluidificanti/superfluidificanti, è opportuno inserire una categoria di prodotti che, per la loro peculiare azione non solo di riduttori d'acqua, si classificano come "idrofughi di massa". Questi additivi tendono a migliorare l'impermeabilità di un calcestruzzo all'acqua, nella cui massa può penetrare:

- ✚ per pressione, come nel caso di opere immerse;
- ✚ per capillarità.

Un calcestruzzo a pori aperti, costituiti da grossi vasi comunicanti, può essere poco capillare ma facilmente attraversato dall'acqua. Al contrario, un calcestruzzo contenente solo dei canalicoli molto fini, potrà assorbire l'acqua per capillarità ma difficilmente può essere permeato per pressione. Questa difficoltà di penetrazione è tanto più elevata, quanto minore è il diametro dei capillari.

A questo proposito si ricorda che, in un calcestruzzo, la parte da impermeabilizzare è la pasta di cemento, dal momento che gli aggregati idonei per il confezionamento d'impasti di qualità devono essere naturalmente poco permeabili; pertanto è sui canalicoli della parte attiva che gli idrofughi di massa devono agire.

Come si formano i capillari della pasta cementizia?

Quando un calcestruzzo è confezionato con un rapporto a:c pari a 0,50, la pasta di cemento è composta all'incirca, in termini di volume, da:

- ✚ 60% d'acqua;
- ✚ 40% di cemento.

L'acqua, in questa prima fase circola liberamente tra i granuli del cemento, composti per la maggior parte da alite e belite (silicato tricalcico e bicalcico) che, con la graduale penetrazione dell'acqua, si decompongono ulteriormente in micro-scaglie. Nello stesso tempo la calce, liberata dall'idratazione, si diffonde nell'ambiente liquido intorno agli stessi granuli. Al contrario, gli alluminati si decompongono progressivamente nell'acqua per ricristallizzarsi in catene. Quindi la zona acquosa, intorno ai granuli di silicati, si satura di calce ed alluminati.

A partire da una data concentrazione, la calce cristallizza e quindi i vuoti tra i granuli si restringono progressivamente sino a non lasciare che dei pori, che sono tanto più fini e regolari, quanto più omogenea è la ripartizione dei granuli di cemento.

L'azione degli idrofughi di massa, che sono composti essenzialmente da finissime particelle idrofobe insolubili, facenti parte del prodotto stesso o formatesi a seguito di reazioni con la calce del cemento, è dovuta principalmente alla dispersione di queste particelle nell'acqua compresa tra i granuli del legante. Il primo effetto è quello di impedire la circolazione dell'acqua; in seguito, la progressiva cristallizzazione respinge le particelle idrofobe nei capillari, che diventano quindi sempre più piccole, sino a che le vie di comunicazione sono completamente ostruite.

I fluidificanti/superfluidificanti idrofughi di massa, contengono anche tensio-attivi e disperdenti che contribuiscono, con la possibile riduzione dell'acqua d'impasto, al miglioramento di tutte le caratteristiche del calcestruzzo.

Tuttavia si precisa che la condizione essenziale per il confezionamento di un calcestruzzo a bassa permeabilità, è quella di studiare una granulometria degli aggregati ben assortita e di utilizzare cementi con elevata finezza di macinazione (Tabella 14); infatti un additivo, anche di eccellente qualità, non può mai rendere impermeabile un cattivo calcestruzzo.

rapporto a/c	Finezza di macinazione di cementi vari (cmq/g)				
	5.200	4.300	3.200	1.700	1.600
0.45	---	---	0.62	1.25	1.50
0.50	0.55	0.75	0.75	1.50	2.12
0.55	0.75	0.75	0.75	2.12	2.25
0.60	0.75	1.00	---	---	---

Tabella 14 - Assorbimento capillare d'acqua a 7 giorni (g/cmq) in relazione alla finezza di macinazione del cemento, prove su malta cementizia 1:3.

L'impiego di questi additivi, è particolarmente consigliato per strutture in calcestruzzo relative a serbatoi e silos interrati, fondazioni in presenza di falde freatiche, canali, opere portuali e, in generale, per tutte le strutture a contatto permanente con l'acqua.

Additivi aeranti

Apparsi in Europa dopo l'ultima guerra e a seguito di una serie di studi, effettuati negli Stati Uniti per la realizzazione di pavimentazioni rigide, gli additivi aeranti trovano il loro preminente campo d'applicazione nel confezionamento di calcestruzzi che devono resistere ai cicli di gelo e disgelo, per la correzione della granulometria degli inerti nel caso di carenza di elementi finissimi o con bassi dosaggi di cemento e infine per il confezionamento e messa in opera di calcestruzzi leggeri.

I due additivi aeranti più comuni sono a base di tensioattivi sintetici o di vinsol resine e devono essere aggiunti all'acqua prima della mescolazione dell'impasto, con proporzioni del $0,3 \div 1\%$ sul peso del cemento, pari a $30 \div 100$ g di prodotto per ogni 100 kg di legante.

Si tratta di prodotti liquidi, non tossici, esenti da cloruri e quindi inoffensivi verso le armature metalliche, che inglobano durante la mescolazione, aria occlusa sotto forma di piccolissime bolle sferoidali, del diametro variabile da 10 a 100 μm , uniformemente distribuite nella massa e costituenti un vero e proprio aggregato molto fine (Figura 24).

Per una quantità d'aria compresa tra il 4 e 6%, cioè pari a 40 e 60 l, per mc d'impasto, le distanze tra le bolle sono dell'ordine di $100 \div 150$ μm .

Lo sviluppo dell'aria si ottiene quando le molecole dell'additivo aerante si orientano, al contatto tra l'aria e l'acqua (la parte idrofoba dal lato dell'aria e la parte idrofila dal lato dell'acqua).

Si forma così una membrana, nell'interfaccia aria-acqua, che tende ad assumere una forma sferica per l'azione della forza esercitata dalle molecole tesio-attive (Figura 25).

Nelle bolle, l'aria è sotto pressione e la pressione è tanto più forte quanto più ridotto è il volume della sfera.

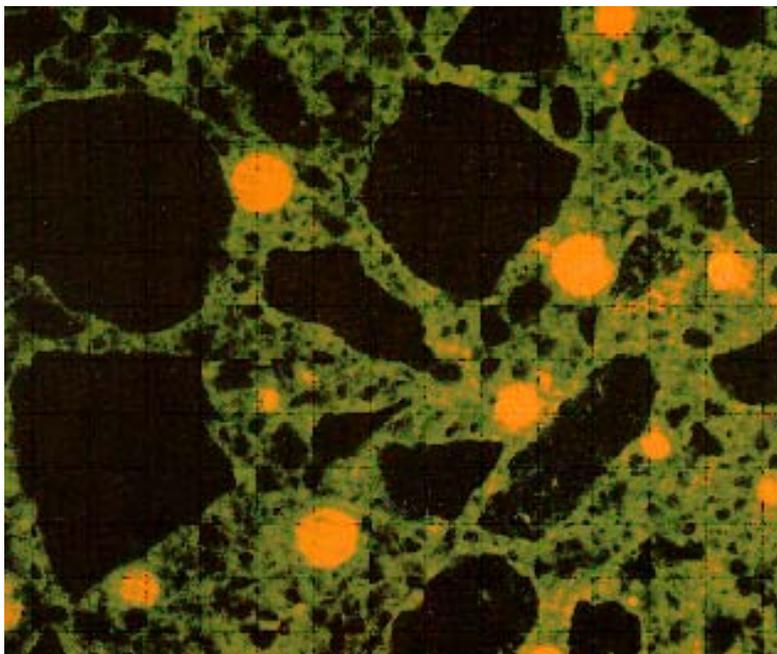


Figura 24 – Microbolle d'aria (arancioni) distribuite nella matrice cementizia del calcestruzzo.

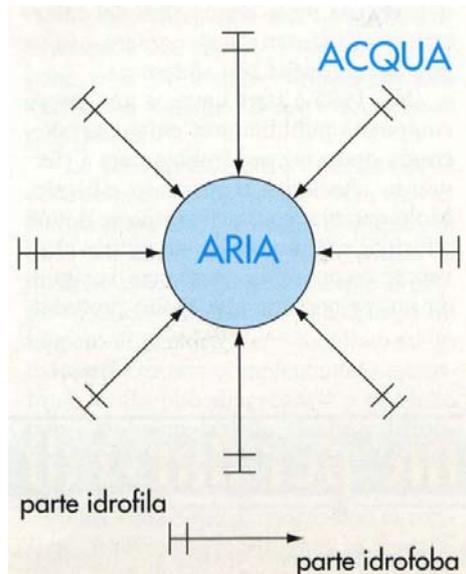


Figura 25 - Molecole d'aerante.

In un calcestruzzo additivato con aerante, la percentuale d'aria inglobata varia in funzione di numerosi fattori,:

- ✚ il dosaggio e la natura dell'aerante utilizzato, che a sua volta influenza il volume d'aria occlusa, la grandezza e la distribuzione delle bolle, così come la loro stabilità;
- ✚ i cementi impiegati, che possono avere composizioni molto diverse; pertanto il tenore d'aria varia secondo la finezza di macinazione, la natura mineralogica ed il loro dosaggio.

Per ottenere la stessa percentuale d'aria, il dosaggio d'aerante deve aumentare:

- ✚ in relazione a quanto più il cemento sia povero di solfati e d'alcali solubili;
- ✚ in relazione a quanto più il cemento sia finemente macinato (Tabella 15).

Finezza blaine (cmq/g)	2.600	3.600	5.000
Aerante (%)	100 (val. di riferimento)	120	175

Tabella 15 - Aumento percentuale del dosaggio di aerante, fatto 100 il valore di riferimento. Prove su malta cementizia 1:3.

Il rapporto a/c influenza non solo il tenore d'aria inglobata, ma anche la distribuzione delle bolle (Figura 26), il cui diametro è tanto più elevato, quanto maggiore è il rapporto a/c. Per a/c pari a 0,35 il diametro varia da 10 a 100 μm , per a/c pari a 0,55 da 20 a 200 μm e per a/c pari a 0,75 da 50 a 500 μm .

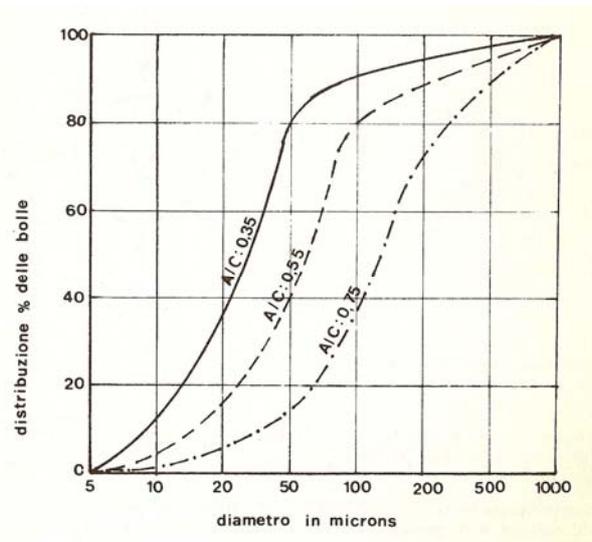


Figura 26 - Influenza del rapporto a/c sulla granulometria delle bolle d'aria di un calcestruzzo

E' noto, tra l'altro, che il contenuto d'aria incrementa con l'aumentare della fluidità del calcestruzzo, sino ad un certo limite oltre il quale inizia a decrescere, similmente a quanto si riscontra con il tempo di mescolazione. Dopo un iniziale accrescimento del contenuto d'aria il suo prolungamento ne determina la progressiva riduzione. Per ultimo, anche la granulometria della sabbia e la sua forma hanno un effetto sostanziale sul contenuto e sulla stabilità del tenore d'aria, in quanto è la frazione tra 0,2 e 0,8 mm che ne trattiene la maggior parte.

L'aggiunta di aeranti determina alcuni importanti miglioramenti sul calcestruzzo fresco ed indurito:

- ✚ la resistenza ai cicli di gelo e disgelo, in quanto il ghiaccio espandendosi nelle bolle non provoca tensioni interne;
- ✚ la diminuzione della fragilità, ossia la resistenza alla flessione aumenta in rapporto a quella a compressione;
- ✚ il miglioramento del faccia vista e della pompabilità, con un limite massimo d'aria inglobata non superiore al 5%, soprattutto nel caso di carenza di elementi fini.

La riduzione d'acqua, resa possibile dal miglioramento della fluidità, che si accompagna con una diminuzione della segregabilità, unitamente all'impiego d'impasti di calcestruzzo con dosaggio di cemento relativamente magro, inferiore a 250 kg/mc, ha per conseguenza il mantenimento o l'aumento delle resistenze meccaniche del conglomerato indurito. Per dosaggi di cemento più elevati, bisogna invece considerare una riduzione della resistenza a compressione di circa il 2 ÷ 3% per ogni percentuale d'aria occlusa.

In effetti, per questi calcestruzzi relativamente grassi, la presenza d'aria inglobata sviluppata da un semplice aerante senza agente fluidificante, non consente una diminuzione d'acqua tale da poter compensare l'effetto sfavorevole dei vuoti d'aria con la formula:

$$Rc = \frac{\frac{C}{A+V}}{\frac{C}{A+V} + P}$$

(1.5)

dove:

- ✚ A e C sono i dosaggi, in peso, di cemento e acqua;
- ✚ V è il volume dei vuoti;
- ✚ P è la massa volumica del cemento.

Infine si ricorda che anche con l'impiego di un semplice aerante, così come con un fluidificante/superfluidificante aerante, è indispensabile un frequente controllo del quantitativo

d'aria inglobata, al fine di verificare eventuali variazioni rispetto ai limiti richiesti e quindi, eventualmente, intervenire sulla granulometria degli aggregati e sulle altre variabili.

Additivi ritardanti

Attualmente il ritardo della presa del calcestruzzo ha assunto una posizione di rilievo nella tecnologia dei getti di massa, stratificati e con frequenti riprese di getto. Nel calcestruzzo normale, il processo di presa inizia generalmente dopo un periodo compreso tra 1,5 e 5 ore, secondo la temperatura ed il tipo di cemento e prosegue col normale processo d'indurimento.

Grazie all'aggiunta dei prodotti ritardanti, il momento dell'inizio della presa può essere rimandato di alcune ore e persino di qualche giorno, così che il calcestruzzo possa rimanere trasportabile, vibrabile e lavorabile più a lungo.

Gli additivi ritardanti rallentano la cinetica d'idratazione del cemento, in funzione del loro dosaggio e dei seguenti fattori:

- ✚ temperatura dell'ambiente e del calcestruzzo;
- ✚ tipo e dosaggio di cemento;
- ✚ rapporto a/c.

Gli additivi ritardanti sono utilizzati normalmente per i calcestruzzi di qualità quando:

- ✚ sia indispensabile un prolungamento programmato dei tempi di messa in opera, al fine di evitare deformazioni che immancabilmente provocherebbero delle fessurazioni;
- ✚ debba essere garantita la sincronizzazione della presa in strutture massicce, gettate a strati;
- ✚ i giunti di ripresa, necessari per interruzioni del lavoro causate dalla fine dei turni di lavoro e del fine settimana, debbano essere realizzati senza casserature inutilmente complicate.
- ✚ il calcestruzzo debba essere rivibrato per eliminare le fessurazioni, per ridurre la permeabilità e migliorarne le resistenze meccaniche finali;
- ✚ il calcestruzzo debba essere trasportato per lunghe distanze, la messa in opera debba essere diluita nel tempo o si operi con elevate temperature ambiente.

L'azione del ritardante sulla cinetica d'idratazione del legante si sviluppa attraverso il rallentamento nella formazione del colloide che si produce nel granulo di cemento, dall'esterno verso l'interno. In tal modo si ottiene, inizialmente, soltanto uno strato gelatinizzato molto sottile, dello spessore di alcuni millesimi di millimetro. La cristallizzazione viene temporaneamente interrotta e, di conseguenza, si determina un ritardo dell'inizio della presa del cemento. Grazie ad un caricamento elettrostatico uniforme dei granuli, il ritardante produce anche un effetto disperdente; pertanto, terminata l'azione principale, si ottiene una più completa idratazione delle particelle di cemento e quindi, con stagionature medio-lunghe, resistenze meccaniche più elevate.

L'efficacia dell'azione ritardante è influenzata da diversi fattori, quali:

- ✚ il dosaggio d'additivo in quanto, a parità di altri fattori, maggiore è il dosaggio di ritardante, più sono lunghi i tempi di presa;
- ✚ il tipo di cemento, poichè a seconda della sua composizione si rilevano grandi differenze di comportamento. Infatti a tal proposito si ricorda che la presa è più rapida con un cemento a macinazione elevata, piuttosto che con uno macinato grossolano; Anche la sua composizione mineralogica è importante, con particolare riferimento al contenuto di C_3A ;
- ✚ la quantità d'acqua d'impasto in quanto, a parità di dosaggio di ritardante, ad un suo aumento corrisponde un aumento dei tempi di presa (Figura 27).

Anche il dosaggio di cemento influenza l'inizio della presa, sia perchè ad un suo aumento corrisponde, a pari lavorabilità, una riduzione del rapporto a/c, sia per il maggior calore sviluppato durante l'idratazione (59); di conseguenza, un aumento del dosaggio di cemento abbrevia sensibilmente, a pari dosaggio di ritardante, i tempi di presa.

È ovvio che ad un aumento e a una riduzione della temperatura ambiente corrisponde una riduzione e un aumento del tempo di presa (Figura 28).

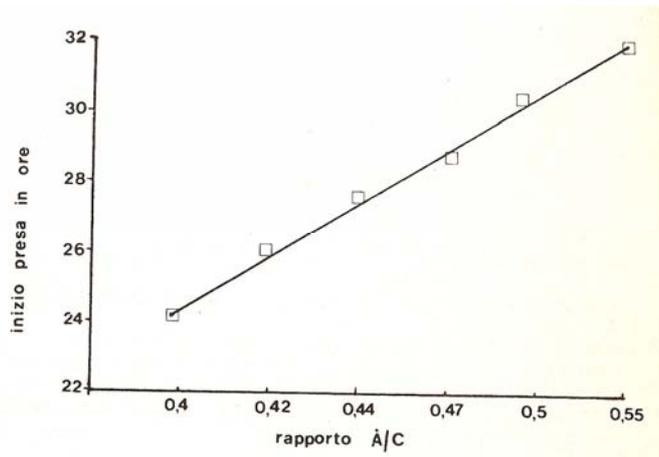


Figura 27 - Influenza del rapporto a/c sui tempi di presa. Calcestruzzo R_{ck} 30 N/mm². Ritardante +1%

Impasto (kg/mc)	200	300	400
Dosaggio ritardante	1,0	1,0	1,0
a/c	0,646	0,436	0,37
Slump (mm)	30	30	30
Aria (%)	1,5	1,9	1,7
Temperatura massima (C°) nel recipiente di misurazione (10 l)	28	33	36
Tempi di presa in ore	29	27	22

Tabella 16 - Influenza del dosaggio di cemento sui tempi di presa, a dosaggio fisso di ritardante.

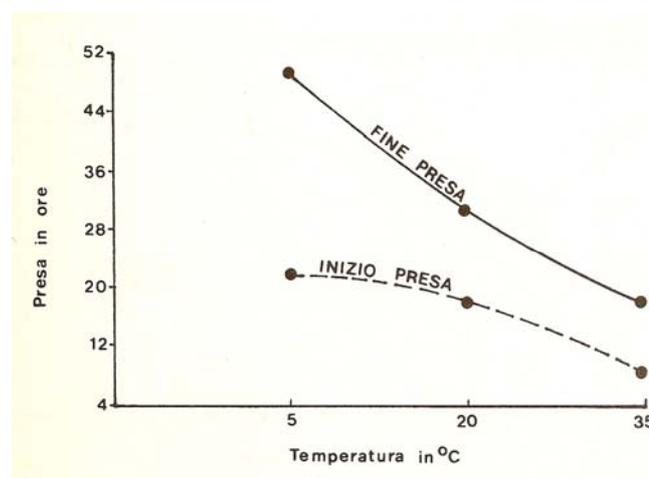


Figura 28 - Influenza delle variazioni della temperatura ambiente sui tempi d'inizio e fine presa. Ritardante + 1%

Additivi acceleranti

Si è già accennato a come la normativa italiana consideri esclusivamente gli additivi che agiscono sull'accelerazione dell'indurimento del calcestruzzo e non solo sui tempi di presa e pertanto si ritiene opportuno chiarire la differenza sostanziale esistente tra i due fenomeni.

I termini di presa e di indurimento di un cemento sono infatti ancora frequentemente confusi, anche dagli operatori del settore del calcestruzzo.

Gli acceleranti di presa sono quegli additivi che, aggiunti all'acqua d'impasto in dosi variabili normalmente dal 2 al 5% sul peso del cemento, agiscono chimicamente per ridurre il tempo intercorrente tra l'impasto e la fase definita "inizio presa", cioè quel punto definito arbitrariamente dalla norma sulla curva d'irrigidimento.

Gli acceleranti d'indurimento, invece, sono quegli additivi che, aggiunti all'impasto di malta o calcestruzzo al momento del confezionamento, permettono d'anticipare il momento nel quale il conglomerato può cominciare a sopportare carichi sempre crescenti.

Sostanzialmente gli additivi classificati come acceleranti di presa hanno un'influenza limitata o addirittura negativa sull'indurimento e quindi sulle resistenze meccaniche alle lunghe stagionature (Figura 29); altri, definiti come acceleranti d'indurimento, sono invece ininfluenti sui tempi di presa, che anzi possono essere leggermente ritardati, ma agiscono con grande efficacia sullo sviluppo delle resistenze iniziali, tanto da poter essere considerati metodi alternativi alla maturazione forzata a vapore.

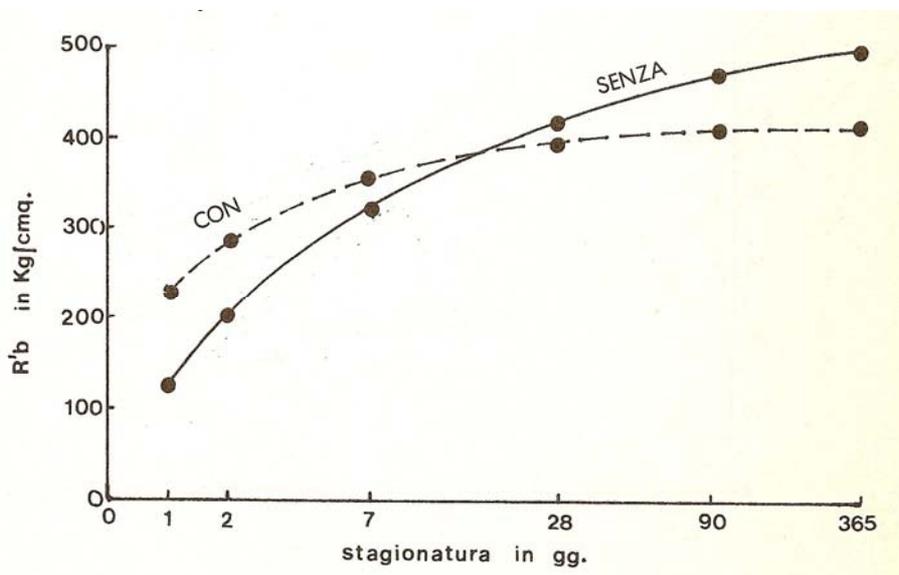


Figura 29 - Influenza di un accelerante di presa sullo sviluppo delle resistenze meccaniche nel tempo

Gli additivi a base di cloruri di calcio e di sodio, di soda, potassa, ecc. appartengono alla categoria degli acceleranti di presa. La loro azione, oltre che essere negativa nei confronti delle resistenze meccaniche alle lunghe stagionature, può determinare, in particolare per la presenza dei cloruri, una rapida ossidazione delle armature e degli impianti metallici incorporati nelle strutture, incrementando la conducibilità elettrica del calcestruzzo; per questo motivo il loro impiego deve essere attentamente valutato.

Pertanto nelle strutture debolmente armate, non vi sono particolari difficoltà d'applicazione; al contrario, la loro aggiunta è proibita nella realizzazione di strutture in c.a. precompresso e di solette nelle quali siano incorporate serpentine di riscaldamento, ecc.

Nei Documents Techniques Unifiés del CSTB, i dosaggi massimi di cloruro autorizzati sono:

- ✚ 2% per le malte, per i calcestruzzi non armati e nei quali le armature abbiano almeno 4 cm di copriferro;
- ✚ 1% per i calcestruzzi nei quali le armature metalliche abbiano meno di 2 cm di copriferro;
- ✚ proibiti per i cementi armati precompressi.

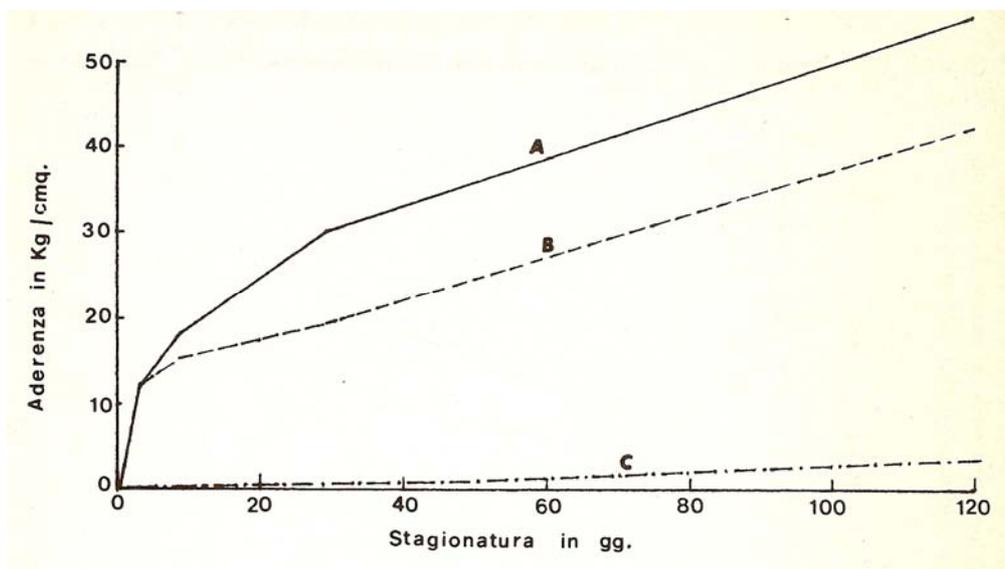
Molto più impiegata ed efficace è quindi la famiglia degli acceleranti di indurimento, formata sostanzialmente da additivi fluidificanti e superfluidificanti modificati; essi agiscono

sostanzialmente sulla dispersione dei granuli di cemento e quindi attraverso una più rapida idratazione del legante..

Additivi antigelo

Quando si mette in opera un calcestruzzo con temperature ambiente $\leq 0^{\circ}\text{C}$, si rischia che la struttura si degradi temporaneamente o, nei casi più gravi permanentemente, qualora il gelo intervenga prima che sia stata raggiunta una minima resistenza a compressione, indicata in 5 N/mm^2 .

A questo proposito si ricorda che, quando la temperatura scende al di sotto di 5°C e quindi l'acqua d'impasto geliva resta libera per più tempo attorno ai granuli del cemento, la presa dello stesso è considerevolmente rallentata,. Quando la temperatura scende sotto 0°C , l'acqua libera gela aumentando il proprio volume del 9% circa. Al momento del disgelo, l'acqua ghiacciata si scioglie, determinando quindi un distacco tra la pasta di cemento fessurata, gli elementi degli aggregati e i ferri d'armatura (Figura 30), con dannosi effetti sulle resistenze meccaniche del calcestruzzo e sulle sue caratteristiche d'impermeabilità e durabilità.



A: calcestruzzo maturato normalmente

B: calcestruzzo soggetto al gelo dopo 3 giorni di stagionatura

C: calcestruzzo soggetto al congelamento immediato

Figura 30 - Influenza del gelo sull'aderenza del calcestruzzo all'acciaio

Al contrario se il processo di presa termina al momento del gelo, più la resistenza del calcestruzzo giovane è elevata, minore o nullo è l'effetto delle basse temperature sul calcestruzzo indurito. E' pertanto evidente che, a partire da un determinato tempo di maturazione e valore di resistenza, il calcestruzzo è "fuori gelo"; in altri termini il gelo non esercita conseguenze dannose per l'indurimento ulteriore. Da quanto sopra esposto, ne consegue che il ruolo degli additivi antigelo è quello di ridurre i tempi di presa e indurimento del calcestruzzo, accelerandone lo sviluppo del calore d'idratazione. Il loro impiego può aumentare di qualche grado la temperatura dell'acqua d'impasto per reazione esotermica e abbassarne il punto di congelamento.

Gli antigelo normalmente commercializzati sono spesso a base di cloruri e sfruttano essenzialmente l'effetto sensibilmente accelerante di questo elemento sulla presa del cemento, sebbene non siano utilizzabili nel caso di strutture armate.

Invece per i calcestruzzi armati, sia normali che precompressi, è indispensabile l'impiego di prodotti antigelo senza cloruri, che hanno la peculiarità, se appropriatamente impiegati, di evitare la formazione degli aghi di ghiaccio che caratterizzano il congelamento dell'acqua d'impasto.

Il dosaggio tipico di questi prodotti, liquidi o in polvere, al fine di assicurare la protezione del calcestruzzo durante il gelo è dell'1% sul peso del cemento, pari a 1 kg di prodotto per ogni 100 kg di legante, con risultati efficaci anche nel caso di temperature di maturazione del calcestruzzo nell'ordine di -10°C dopo le prime ore dal getto.

Gli additivi antigelo ed anti-gelivi, compositi, sono più evoluti, esercitando un'azione multipla:

- ✚ favoriscono lo sviluppo del calore d'idratazione del cemento, anche alle basse temperature;
- ✚ riducono sensibilmente il rapporto a:c per la loro efficace azione fluidificante, diminuendo l'acqua libera geliva;
- ✚ accelerano l'indurimento del calcestruzzo per la loro azione disperdente sui granuli del cemento, favorendo una più rapida e completa idratazione delle particelle;
- ✚ inglobano un limitato quantitativo d'aria, migliorando la resistenza del calcestruzzo indurito alle alternanze dei cicli di gelo e disgelo.

Si aggiungono al calcestruzzo insieme all'acqua d'impasto, in proporzioni dell'1% e del 2% sul peso del cemento, rispettivamente con temperature sino a -5°C e -10°C.

L'uso di prodotti antigelo anche di grande efficacia, non esime comunque il Costruttore, come spesso ed erroneamente si crede, dall'adottare tutte quelle regole che garantiscano la buona riuscita di un getto di calcestruzzo con basse temperature.

Qui di seguito si elencano le principali tra queste regole:

- ✚ scegliere un cemento ad elevato calore di idratazione e quindi con elevata finezza di macinazione;
- ✚ impiegare un dosaggio di cemento non inferiore a 350 kg/mc, per aggregati con D_{max} 30 mm; ciò significa che, nei limiti relativi ad ogni mix-design, al fine di evitare ritiri importanti, è opportuno selezionare il dosaggio di cemento più elevato;
- ✚ non utilizzare aggregati ghiacciati;
- ✚ proteggere casseforme spesse e ben coibentate, preferibilmente di legno;
- ✚ confezionare impasti di calcestruzzo con slump ridotto, nell'ordine di 80 ÷ 100 mm massimi o con rapporto a/c $\leq 0,50$;
- ✚ non gettare il calcestruzzo con temperature vicino a 0°C, se il rapporto volume:superfici esposte è sfavorevole, come nel caso di strutture sottili, pavimentazioni, ecc.;
- ✚ **RICORDARE CHE L'ADDITIVO ANTIGELO E' UN METODO AUSILIARIO PER REALIZZARE I GETTI IN INVERNO E NON UN PALLIATIVO PER SANARE LA DISORGANIZZAZIONE DEL CANTIERE.**

Le aggiunte per il calcestruzzo

In questa categoria rientrano ,sia i materiali inerti o quasi inerti, quali i filler calcarei, silicei, sia i prodotti pozzolanici o ad attività idraulica latente.

Si precisa che:

- ✚ il loro impiego serve sostanzialmente a correggere la frazione fine della granulometria degli aggregati, così da facilitare il pompaggio del calcestruzzo, ridurre il bleeding, i rischi di segregazione, ecc.;
- ✚ la quantità da impiegare deve essere limitata, secondo la buona tecnologia, sebbene la norma non stabilisca dei limiti, così da evitare effetti dannosi sul conglomerato indurito, in particolare sul ritiro, sulla deformazione plastica sotto carica costante, ecc.;
- ✚ si tratta di polveri finissime con diametro di 0,75 μm , la cui aggiunta ha come conseguenza un aumento del fabbisogno di acqua; ne deriva la necessità di compensare questo aspetto negativo mediante l'additivazione del calcestruzzo con fluidificanti o meglio superfluidificanti, il cui dosaggio deve essere calcolato sulla quantità totale di cemento più filler, perché l'effetto disperdente dell'additivo aumenta l'efficacia del filler stesso.

La famiglia delle aggiunte pozzolaniche o ad attività idraulica latente ha conquistato un rinnovato interesse, alla luce della nuova sensibilità del Committente, del Progettista e del Normatore nei confronti della durabilità di un'opera e quindi della sua capacità di mantenere le proprie caratteristiche funzionali nel tempo, procrastinando gli interventi manutentivi, ordinari e straordinari, normalmente molto costosi. Molta attenzione ed attesa, per la verità più all'estero che in Italia, si ha anche in relazione alle possibilità di produrre calcestruzzi iper-prestazionali, ad alte ed altissime resistenze meccaniche, sia per i risvolti ingegneristici del prodotto (nuove dimensioni degli elementi in calcestruzzo), sia per quelli economici (riduzione delle sezioni = minor peso

globale dell'opera = minori carichi sui terreni = maggiori possibilità di sviluppo verticale delle costruzioni o minori oneri per le opere di fondazione).

Malgrado la definizione ufficiale, tutte le aggiunte non inerti sono caratterizzate da una più o meno accentuata azione pozzolanica, intendendosi con fattore di efficacia la velocità di tale reazione, condizionata non tanto dal contenuto di SiO_2 bensì dalla superficie specifica e dalla granulometria dell'aggiuntivo.

Inoltre si precisa che le pozzolane naturali, utilizzate normalmente per le produzioni nell'industria cementiera, sono escluse da questo intervento, mentre si focalizza l'attenzione sui prodotti di provenienza industriale, cioè derivati da cicli di produzione ben definiti e quindi caratterizzati, per quella data produzione e provenienza, da parametri compositivi costanti. Comunque in linea generale, le aggiunte pozzolaniche o a reazione idraulica latente si possono considerare come componenti del calcestruzzo finalizzate alla produzione di conglomerati cementizi di qualità, in particolare tese al miglioramento della loro durabilità nei confronti degli aggressivi naturali.

Le "pozzolane artificiali" più comunemente utilizzate ed ormai diffuse sul mercato sono:

- ✚ le ceneri volanti (fly ash), residui solidi ricavati dalla combustione del polverino di carbone fossile nei forni termici;
- ✚ le loppe d'alto forno, che sono un prodotto secondario della lavorazione della ghisa, utilizzate sotto forma di polvere finemente macinata;
- ✚ i fumi di silice condensati (silica fume), polveri ultrafini derivate dai processi di produzione del silicio e delle leghe ferro-silicio, attraverso la riduzione di quarzo con carbone in archi voltaici elettrici.

Una prima differenza tra questi tre aggiuntivi, è che i primi due tipi sono definibili ad attività idraulica latente, cioè sono in grado di reagire con l'acqua solo in presenza di calce, mentre il terzo prodotto ha modeste proprietà idrauliche e la presenza di calce agisce solo come acceleratore del processo.

La cenere volante

La cenere volante si presenta essenzialmente sotto forma di particelle sferiche, con diametro compreso tra circa 1 e 100 μm ; dal punto di vista chimico è un materiale di natura prevalentemente silicea ed alluminosa, costituito da una microstruttura vetrosa. Il contenuto di SiO_2 può variare, a seconda della natura del carbone utilizzato nella combustione, tra il 47% ed il 35%.

La norma ASTM C 618 le distingue, in funzione del contenuto di calce e dell'incombusto, in tipo F (meno calce, più incombusto) e tipo C (più calce e meno incombusto).

La cenere volante è disponibile in grandi quantità nelle aree geografiche del centro Europa, mentre in Italia è presente con valori molto inferiori, pari a circa 1 milione di t/anno.

La normativa italiana di riferimento consta delle prescrizioni UNI EN 450-1 "Ceneri volanti per calcestruzzo – Parte 1: Definizioni, specificazioni e criteri di conformità" e UNI EN 450-2 "Ceneri volanti per calcestruzzo – Parte 2: Valutazione della conformità" che fornisce alcuni importanti elementi di valutazione quali:

- ✚ il contenuto di SiO_2 , in peso, non deve essere inferiore al 25%;
- ✚ l'indice di attività, come rapporto percentuale tra la resistenza a compressione di provini normalizzati di malta preparata con il 75% di cemento ed il 25% di ceneri volanti (in peso) e quella di provini normalizzati, di una malta preparata con il solo cemento di riferimento, non deve essere minore del 75% a 28 giorni e dell'85% a 90 giorni;
- ✚ non devono contenere ossido di magnesio MgO , che potrebbe causare effetti d'espansione sul calcestruzzo;
- ✚ la perdita al fuoco deve essere minore del 5% in peso, valore che può essere portato al 7% su base nazionale; il contenuto di cloruro, espresso come ione cloro Cl , deve essere $\leq 0,10\%$ in peso; quello dell'anidride solforosa $\text{SO}_3 \leq 3\%$;
- ✚ il contenuto di ossido di calcio libero, deve essere $\leq 1\%$ in peso ma è consentito anche un massimo del 2,5%, purchè siano soddisfatti i requisiti di indeformabilità, cioè che l'espansione determinata secondo il metodo Le Chatelier su legante preparato con il 50% di cenere volante ed il 50% di cemento sia inferiore a 10 mm.

Attualmente le ceneri volanti sono impiegate prevalentemente dai produttori di calcestruzzo preconfezionato come materiale correttivo della frazione granulometrica finissima dell'aggregato ed in parziale sostituzione del cemento. Poiché il quantitativo di cemento sostituito con cenere è

direttamente proporzionale al tempo d'indurimento del calcestruzzo (Tabella 17), è consigliabile non superare il 30% d'aggiunta, in quanto valori superiori potrebbero determinare una carenza di calce, che è indispensabile per attivare l'idraulicità delle ceneri e la loro attività pozzolanica. La reattività delle ceneri è maggiore con i cementi più finemente macinati e ricchi di silicato di calcio, quindi con maggior contenuto di clinker. D'altra parte, le ceneri più ricche in silice e più fini, risultano più reattive con la calce di idrolisi del clinker di Portland.

Composizione % della pasta legante con cenere volante in sostituzione del cemento		Tempo di maturazione a + 20°C in giorni					
		1	7	28	90	180	365
Cenere %	Cemento %	Resistenza a compressione (N/mm ²)					
0	100	9,0	25	30	38	45	50
10	90	8,1	22	29,5	39	47	53
20	80	7,5	21	29,0	38,5	46	52
30	70	4,5	18	25	35	45	51
40	60	4,0	16	20	30	42	48

Tabella 17 – Resistenze a compressione del calcestruzzo in funzione del dosaggio di cenere volante rispetto a quello con solo cemento.

La loppa finemente macinata

La loppa finemente macinata è ampiamente diffusa per la produzione di cementi compositi, che sono classificati dalla norma UNI EN 197-1:2007, in funzione del contenuto di clinker e di loppa (Tabella 18).

Tipo di cemento	Clinker %	Loppa %
CEM II/A-S	80-94	20-6
CEM II/B-S	65-79	35-21
CEM III/A	35-64	65-36
CEM III/B	20-34	66-80
CEM III/C	5-19	95-81
CEM V/A	40-64	30-18
CEM V/B	20-39	50-31

Tabella 18 - Classificazione dei cementi contenenti loppa d'alto forno, secondo UNI EN 197-1:2007 (CEM II sta per Cemento Portland alla loppa, CEM III per Cemento d'Alto Forno, CEM V per Cemento Composito).

Dal punto di vista chimico, la loppa d'alto forno contiene dal 30 al 45% di SiO₂ e, se viene finemente macinata, si presenta sottoforma di polvere con dimensione granulare variabile tra circa 1 e 100 µm e con superficie specifica Blaine di circa 4000 cm²/g, quindi con caratteristiche molto vicine a quelle delle più utilizzate ceneri volanti.

I miglioramenti riscontrabili sul calcestruzzo indurito modificato con loppa d'alto forno finemente macinata, sono particolarmente importanti in relazione al miglioramento delle prestazioni meccaniche del conglomerato cementizio, mentre agli effetti della durabilità le prestazioni più interessanti si verificano nei confronti dell'attacco solfatico, della penetrazione del cloro e dell'attacco dei sali disgelanti (CaCl₂), qualora il reattivo venga utilizzato in aggiunta al normale dosaggio di cemento, e in misura minore agli effetti della carbonatazione.

Il fumo di silice

Il fumo di silice si presenta, normalmente, sotto forma di polvere estremamente fine, con dimensioni delle particelle tra 0,05 e 0,5 μm e con una superficie specifica tra 10 e 35 m^2/g .

Nasce dal moderno processo di riduzione della quarzite in forni di tipo elettrico, con genesi molto simile a quella delle pozzolane naturali, di origine vulcanica; è essenzialmente costituito da silice amorfa presente in percentuale maggiore del 75% e frequentemente del 90%. Per questo motivo, il fumo di silice è definibile come una "superpozzolana", in quanto il rapporto che intercorre tra la dimensione diametrale di questo reattivo e quella delle particelle del cemento è pari a circa 1:100.000. Se al peso di cemento si aggiunge il 10% di fumo di silice, ciascuna particella di cemento è avvolta da uno strato continuo di fumo di silice, costituito da circa 100.000 particelle di reattivo, la cui azione pozzolanica conduce a un'uniforme distribuzione dei prodotti dell'idratazione (Figura 31); oltre a ciò si riscontra un positivo effetto filler, con il riempimento degli interspazi tra i cristalli lamellari di idrosilicati di calcio, che contribuisce alla formazione di una pasta di cemento con struttura più chiusa ed uniforme.



Figura 31 – Struttura microcristallina della pasta di cemento, senza fumi di silice (a sinistra) e con fumi di silice (a destra).

Rispetto alle ceneri volanti, i fumi di silice sono disponibili in modeste quantità, pari a circa 400.000 t/anno in tutto il mondo, di cui circa 200.000 t/anno sono prodotte in Europa (130.000 t/anno nella sola Norvegia) e circa 100.000 t/anno nel Nord America, con produzioni praticamente trascurabili in Italia. Questo rende il prodotto economicamente pregiato e quindi, utilizzabile esclusivamente per il confezionamento di calcestruzzi con prestazioni, sia in termini di resistenza meccanica che di durabilità, non ricavabili in modalità altrettanto convenienti con altre tecnologie. Questo anche in ragione della possibile elevata riduzione di cemento consentita, dovuta ad un fattore di efficacia pari a circa 4; Ciò significa che per ogni kg di silice fume, si possono togliere 4 kg di cemento, con conseguente riduzione della calce di idrolisi.

Questa aggiunta è normalizzata dalla UNI EN 13263 ma si ritiene più esaustivo quanto contenuto nella norma francese, la NFP 18-502 del 1992 "Additions pour béton hydraulique - Fumées de silice", che fissa le precisazioni relative a questa classe di reattivi particolarmente interessante.

I fumi di silice vengono classificati in due classi, secondo i parametri sotto indicati (Tabella 19):

Parametro	Classe	
	A	B
SiO ₂	> 85%	70 ÷ 85%
CaO	< 1,2%	< 20%
SO ₃	< 2,5%	< 2,5%
Na ₂ O-K ₂ O	< 4%	< 4%
Cl ⁻	< 0,2%	< 0,2%
Carbone libero	< 4%	< 4%
Area specifica B.E.T	20 ÷ 35 m ² /g	10 ÷ 20 m ² /g
Massa volumica assoluta	2,1 ÷ 2,3 kg/l	2,1 ÷ 2,4 kg/l

Tabella 19 - Precisazioni caratteristiche dei fumi di silice secondo la norma NFP 18-502.

Da diverse esperienze ricavate dalla ricerca in laboratorio e dal cantiere, si sono potuti definire alcuni concetti che possono orientare gli utenti verso la scelta del prodotto più idoneo, attraverso la definizione di parametri chimico-fisici dei silice fume disponibili sul mercato (Tabella 20).

Parametri chimico-fisici ottimali dell'aggiuntivo a base di fumi di silice	Note esplicative
<p>SiO₂ > 88%</p> <p>K₂O < 1,5%</p> <p>Na₂O < 1,0%</p> <p>C < 2,0%</p> <p>SO₃ < 1,0%</p> <p>Loss of ignition L.O.I. < 1,0%</p> <p>Densità apparente: 0,5 - 0,7 kg/l Tipo di densificazione: meccanica/pneumatica</p>	<p>1. - Valori più alti di (K₂O+Na₂O) possono aumentare la reattività del legante nei confronti degli aggregati reattivi (reazione alcali - aggregati) e riducono la resistenza a compressione.</p> <p>2. - Il carbone (carbon-black) assorbe i superfluidificanti e gli aeranti e quindi: più carbon-black = meno fluidificazione e minor inglobamento di aria utile per la protezione nei confronti dei cicli di gelo-disgelo.</p> <p>3. - Più alto è il valore di L.O.I. (perdita al fuoco a 800°C), tanto maggiore è il contenuto di sostanze incombuste nel prodotto.</p> <p>4. - L'impiego di prodotti densificati consente la riduzione del costo del trasporto e la semplificazione del problema d'insilaggio e di estrazione dei fumi di silice sfusi. La densificazione: può essere pneumatica o meccanica; con il primo sistema si ha una dispersione del fumo di silice più rapida ed una maggiore superficie specifica.</p>

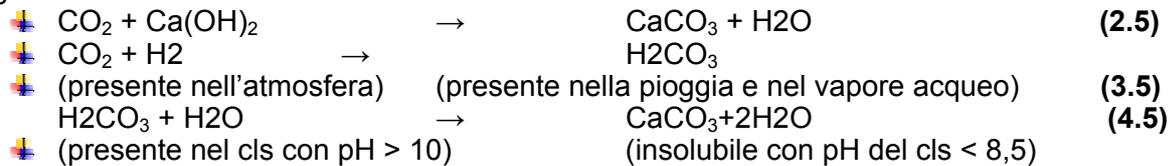
Tabella 20 - Parametri orientativi per la scelta dell'aggiuntivo a base di silice fume e note esplicative.

Oltre a quanto accennato, è molto importante l'effetto filler e tixotropizzante di questa finissima aggiunta, sempre in relazione alla superficie specifica del prodotto. Se si considera che l'aggiunta di 30 kg di fumo di silice per mc apporta una superficie pari a quella di circa 500 kg di CEM I, è evidente che i calcestruzzi così modificati risultano completamente esenti da segregazione e bleeding, trasformati in miscele plastiche, coesive e tixotropiche.

Un calcestruzzo tixotropico allo stato di riposo si presenta molto adesivo, oltre che coesivo, mentre diventa fluido in movimento o sottoposto a vibrazione. Queste caratteristiche sono molto vantaggiose per il confezionamento di impasti cementizi facilmente pompabili, anche a lunga distanza, o nel campo dei calcestruzzi proiettati meccanicamente, detti shotcrete o spritzbeton che, una volta applicati su superfici verticali o sopratesta, non devono colare e devono aderire perfettamente al supporto, anche se applicati in spessori rilevanti pari ad almeno 10 cm per strato.

I fumi di silice e la protezione delle nuove strutture in c.a. soggette all'aggressione dell'anidride carbonica

Si tratta di un argomento di grande attualità, visti gli spettacolari esempi di degrado delle strutture in calcestruzzo armato, sia delle grandi infrastrutture, sia quotidianamente per il costo condominiale per il rifacimento di facciate e frontalini di balconi nelle costruzioni abitative. Causa di aggressione più evidente e diffusa, in relazione alla sempre maggiore industrializzazione del territorio, al traffico ed ai non collaudati sistemi di riscaldamento, è quello da carbonatazione del calcestruzzo, provocata dall'azione dell'anidride carbonica, CO₂, verso l'idrato di calcio Ca(OH)₂. L'anidride carbonica è un elemento sempre presente nell'aria, in concentrazioni variabili tra lo 0,023 e lo 0,050% che, nelle situazioni di inquinamento, arrivano a ben lo 0,092 ÷ 0,200%. Il fenomeno chimico è determinato dalla combinazione del Ca(OH)₂ proveniente dall'idratazione del cemento, con la CO₂ e conseguente formazione di calcare e di acqua, secondo lo schema di seguito.



Il calcare, insolubile in acqua, si deposita nei pori della pasta cementizia, mentre l'acqua liberata scioglie nuovamente parte dell'idrato di calcio della pasta stessa e, conseguentemente, continua la reazione con l'acido carbonico.

A seguito di ciò, si determinano due tipi di azioni aggressive:

- ✚ aumento del fenomeno fessurativo della pasta cementizia;
- ✚ riduzione del pH della soluzione che permea i pori capillari per la formazione di calcare e di bicarbonato alcalini, fino ad un valore di circa 8,5; a questo valore del pH, il ferro delle armature non è più passivato ed in presenza d'umidità (situazione di maggior rischio con U.R. pari a 50%) viene ossidato e corrosivo dall'ossigeno dell'aria (Figura 32).



Figura 32 - Ossidazione e corrosione di ferri d'armatura per carbonatazione del calcestruzzo.

Da questo, risulta evidente la relazione tra la qualità della pasta di cemento e la velocità dell'aggressione per carbonatazione, quindi dalla porosità del calcestruzzo e dalla cattiva messa in opera e stagionatura protetta. In particolare, si devono prescrivere:

- ✚ cementi a basso contenuto di clinker, quindi con limitata attitudine alla produzione di Ca(OH)_2 , il cui contenuto, in un cemento tipo CEM I, può arrivare fino al 25% del peso del legante (circa 75 kg di idrossido di calcio per 300 kg di cemento);
- ✚ rapporto a/c $\leq 0,45$;
- ✚ classe di fluidità $\geq S4$, al fine di assicurare un corretto grado di compattazione, anche con modeste attrezzature a disposizione;
- ✚ copriferro sufficientemente spesso e compatto.

Due sono le strade percorribili per garantire una sufficiente durabilità della struttura nei confronti della carbonatazione:

- ✚ la protezione delle superfici del calcestruzzo, con specifici trattamenti pellicolari;
- ✚ l'impiego di fumi di silice, meglio se combinati con specifici additivi High Range Water Reducer - HRWR, idonei a modificare positivamente le caratteristiche chimiche del legante e la permeabilità all'acqua ed ai gas della pasta cementizia.

Nel primo caso, l'improvvisazione e l'ignoranza dei fenomeni di trasmigrazione dei liquidi e dei gas, ha determinato e determina una serie di errori di concetto, per quanto riguarda la scelta del trattamento idoneo. Dopo le negative esperienze con le vernici a base epossidica, eccessivamente impermeabili nei confronti del vapore acqueo, si sono apprezzati i trattamenti superficiali, detti a griglia molecolare, caratterizzati cioè da una modesta resistenza alla diffusione di questo elemento (molecola di piccolissime dimensioni) e, nel contempo, da una modestissima permeabilità nei confronti dell'anidride carbonica (molecola più grossolana) (Tabella 21).

Prodotto	Spessore rivestimento (cm)	Resistenza diffusione del vapore acqueo in m d'aria equivalenti	Resistenza diffusione della CO₂ in m d'aria equivalenti
Calcestruzzo ordinario	1,00	0,30	3,60
Calcestruzzo con SF + HRWR	1,00	0,90	14,40
Malta cementizia modificata con dispersione acrilica in acqua	0,20	0,60	70,00
Pittura con silicati naturali	0,06	0,04	8,00
Vernice epossidica	0,06	12,00	180,00
Vernice al clorocaucciù	0,06	15,00	5.200,00
Vernice al metacrilato	0,06	2,10	560,00
Vernice di etilene	0,06	1,00	2.080,00

Tabella 21 – Resistenza alla diffusione del vapore acqueo e della CO₂ di diversi rivestimenti, espressa in metri d'aria equivalenti.

Rispetto al calcestruzzo ordinario, si può evidenziare che per una resina epossidica, a fronte di un elevato e negativo aumento della resistenza alla diffusione del vapore acqueo (fattore 40x), corrisponde un discreto miglioramento della resistenza alla diffusione della CO₂ (fattore 50x). Per i metacrilati e gli etilenici i due fattori sono, rispettivamente, 3x - 7x e 155x - 277x. Anche il calcestruzzo modificato con silice fume più superfluidificante evidenzia un miglioramento nei confronti del vapore acqueo (fattore 3x) e della CO₂ (fattore 4x).

Sicuramente, l'aggiunta di fumi di silice è più efficace attraverso le modificazioni che questo aggiuntivo determina sia sulla struttura cristallina della pasta, che sulla sua porosità.

In particolare a questo proposito si cita la reazione pozzolanica in relazione alla nota capacità della silice di fissare l'idrato di calcio, detto anche calce libera, sotto forma di idrosilicato dello stesso sale secondo la reazione:



Attraverso l'impiego di un porosimetro al mercurio, sono state analizzate le dimensioni diametrali dei pori, sia di una pasta di cemento di un calcestruzzo ordinario, sia di una di un calcestruzzo modificato con silice fume:

✚ nel primo caso: calcestruzzo testimone, sigla T, con CEM I 42,5 dosato in ragione di 350 kg/mc;

✚ nel secondo caso: stesso calcestruzzo, sigla FS, con silice fume al 10% sul cemento.

Per entrambi i calcestruzzi sono stati adottati tipo identico e dosaggio di cemento con stessa consistenza (Tabella 22).

Sigla	N° prova	Porosità (mm ³ /g)	Porosità Vol. %	Massa volumica apparente	Superficie specifica (m ² /g)
T1	P01	37,60	12,60	2,24	6,0
T''	P03	37,90	11,90	2,28	4,5
FS1	P02	24,90	5,70	2,31	2,5
FS2	P04	27,60	6,50	2,36	2,5

Tabella 22 – Misura della porosità con porosimetro al mercurio.

La Tabella 22 dimostra che il calcestruzzo con fumi di silice ha una porosità ridotta di circa il 45 ÷ 50%, con piccola dimensione diametrale molto fine, tanto che i pori da 10³ a 10ⁿ rappresentano il 45% contro il 28% in quello ordinario.

Infine con gli stessi calcestruzzi sono state effettuate prove di carbonatazione, introducendo i provini in un locale di trattamento carbonico accelerato regolato a 20 ± 1°C con il 50 ± 5% di umidità relativa e con il 70 ± 5% di CO₂ in volume. Dopo 18 giorni e 1, 2, 3, 4, 6 mesi di conservazione i provini sono stati tolti e rotti per taglio; quindi si è determinata la profondità di carbonatazione polverizzando, sulle facce dei provini appena rotti, una soluzione idro-alcoolica di fenoftaleina.

Serie	Denominazione	16 gg	1 m	2 m	3 m	4 m	6 m
3100	Cls testimone Cemento 350 kg/mc	2,0	4,5	5,5	7,0	10,0	14,0
3300	Cls con silice fume 10% Cemento 350 kg/mc	0,0	1,0	1,5	1,5	2,0	3,0

Tabella 23 – Profondità di carbonatazione in mm; prova accelerata in camera carbonica.

A titolo comparativo, per ottenere la corrispondenza tra l'esposizione per 6 mesi nell'ambiente carbonico e la durata effettiva, nel caso di conservazione nell'ambiente naturale, possiamo applicare la formula di Kishitani. Con un rapporto a/c utilizzato pari a 0,53, la formula è:

$$t \text{ (anni)} = [7,2/R (4,6 \text{ a/c} - 1,76)] X^2 \text{ (cm)} \quad (6.5)$$

dove R è un valore caratteristico variabile tra 0,2 e 6,4. Per un normale calcestruzzo con CEM I, R è uguale a 1,0; X è la profondità di carbonatazione espressa in cm.

$$[7,2/1,0 (4,6 \times 0,53 - 1,76)] = 4,88 \quad (7.5)$$

Sostituendo tali valori nella formula, si ottiene che per una profondità di carbonatazione di 1,4 cm, fornisce:

$$T \text{ (anni)} = 4,88 \times 1,4^2 = 4,88 \times 1,96 = 10 \text{ anni.} \quad (8.5)$$

Un calcestruzzo normale dopo 10 anni di conservazione nell'ambiente naturale ha, quindi, una profondità di carbonatazione di 14 mm, mentre quello con fumo di silice di soli 3 mm, con un fattore di riduzione pari a 4,5.

La reazione pozzolanica e le prestazioni del calcestruzzo

L'attività comune a tutti gli aggiuntivi illustrati, sia pure con diverso grado di efficacia, è la reattività pozzolanica (Figura 33), che consiste nella reazione tra il diossido di silice reattiva SiO_2 e l'idrato di calcio Ca(OH)_2 , in presenza di acqua



(9.5)

con formazione di colloide idrosilicato di calcio (C-S-H), noto anche come "tobermorite".

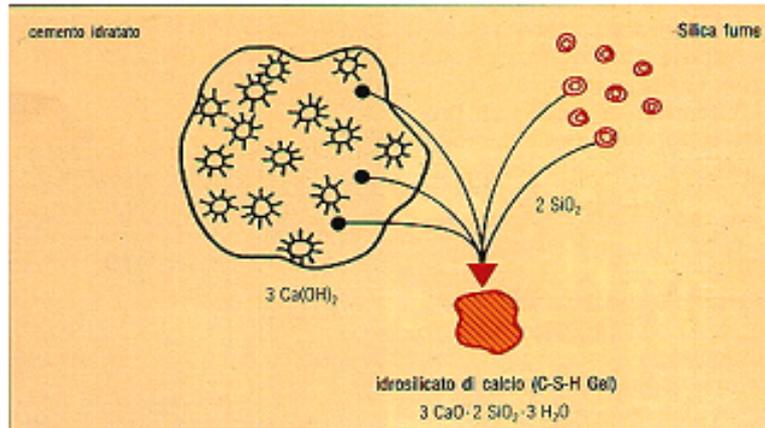


Figura 33 – Schema della reazione pozzolanica.

D'altra parte, l'aumentato fabbisogno d'acqua dovuto all'aggiunta di polveri fini o ultrafini all'impasto, può vanificare totalmente o parzialmente gli effetti benefici di questa reazione, per cui è praticamente indispensabile utilizzare i reattivi in abbinamento con un superfluidificante, che sarà dosato proporzionalmente al totale del peso del cemento più quello del reattivo stesso (Figura 34). Ne consegue che più l'aggiuntivo è fine, tanto maggiore deve essere il dosaggio di superfluidificante.

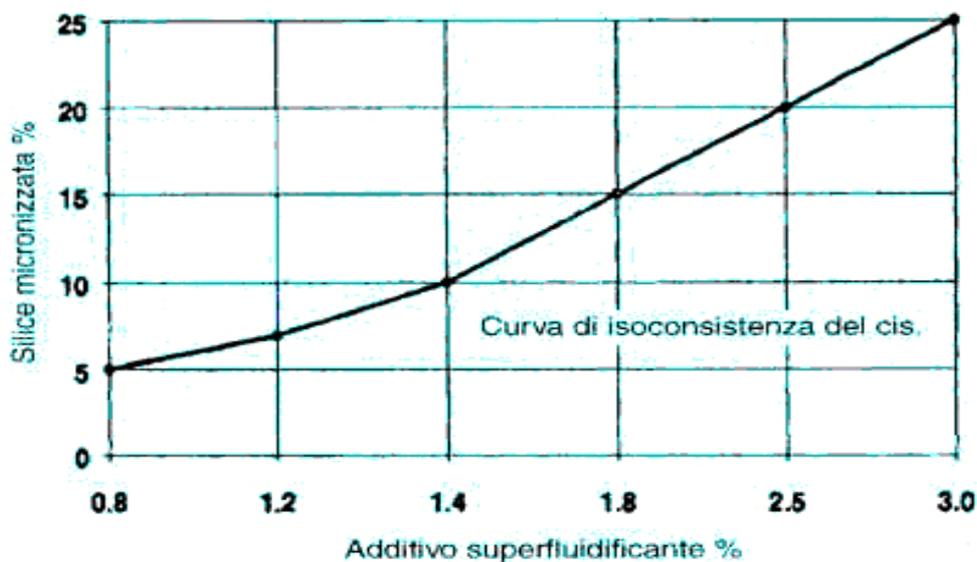


Figura 34 - Dosaggio di superfluidificante in funzione della percentuale di fumo di silice per confezionare un calcestruzzo classe S4.

L'impiego abbinato dei reattivi pozzolanici, con particolare riferimento ai fumi di silice, con un superfluidificante, migliora la maggior parte delle caratteristiche prestazionali del calcestruzzo indurito.

Permeabilità all'acqua con i fumi di silice

L'aggiunta del 10% di aggiuntivo modificato con superfluidificante, sul peso del cemento, riduce la permeabilità all'acqua rispetto al calcestruzzo ordinario quasi ad un decimo.

Prove di penetrazione eseguite secondo la DIN 1048, hanno fornito i valori qui di seguito riportati (Tabella 24):

Silica fume modificato con superfluidificante (%)	Profondità media di penetrazione dell'acqua (mm)
15	2
10	5
5	14
2,5	18
0	40

Tabella 24 - Profondità di penetrazione dell'acqua su calcestruzzi con e senza dosaggi variabili di aggiuntivo a base di fumi di silice e superfluidificante (con ciclo di carico dell'acqua di: 24 ore a 0,5 Bar, 24 ore a 1,0 Bar, 24 ore a 2,0 Bar).

Altissime resistenze meccaniche con i fumi di silice

Grazie alla combinazione cemento e aggiuntivo reattivo, più superfluidificante, con aggregati di alta qualità, sono possibili aumenti di resistenza sino ad oggi impensabili, quasi al livello dell'acciaio. In particolare è possibile dire che:

- ✚ nel calcestruzzo ad alta resistenza ($> 60 \text{ N/mm}^2$), il reattivo può essere aggiunto anche in parziale sostituzione del cemento;
- ✚ nel calcestruzzo ad altissima resistenza ($> 100 \text{ N/mm}^2$), il reattivo deve sempre essere utilizzato in aggiunta al cemento e, inoltre, gli aggregati non possono essere del tipo normalmente impiegato, bensì graniti, diabasi, ecc.

Questa seconda tecnologia semplifica la realizzazione di costruzioni alte, in quanto si possono progettare strutture più sottili e quindi più leggere (Figure 35 e 36) o confezionare calcestruzzi speciali, ad esempio per casseforti, con resistenza $> 200 \text{ N/mm}^2$ e, in determinate situazioni, sostituire elementi strutturali in acciaio con meno onerosi elementi in calcestruzzo.

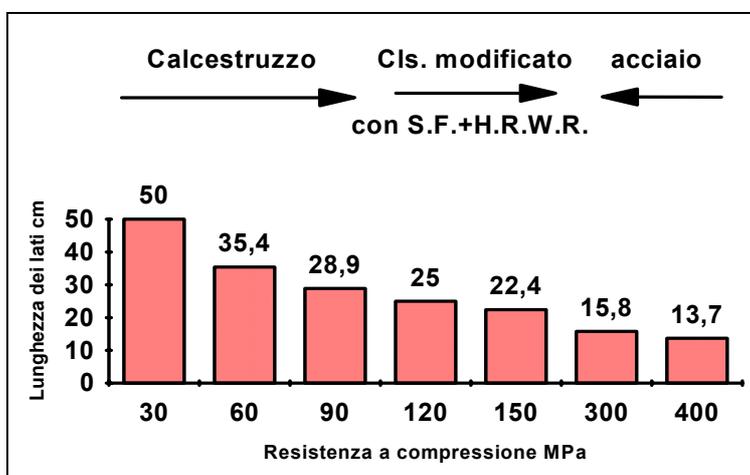


Figura 35 - Sezione di pilastri a pari portata (S.F. = silice fume, HRWR = superfluidificante prestazionale).

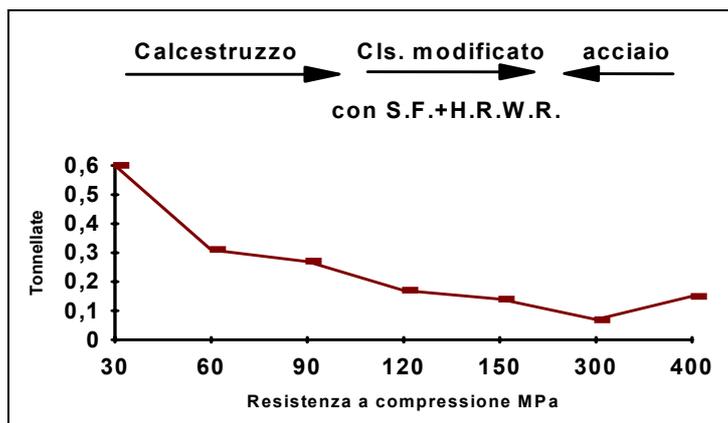


Figura 36 - Peso di pilastro h 1 m, avente pari portata, in relazione alla resistenza a compressione del materiale (S.F. = silica fume, HRWR = Superfluidificante prestazionale).

Per maggiori chiarimenti ed approfondimenti relativi alle aggiunte si rimanda il lettore alla più che ampia letteratura in merito. Comunque qui di seguito si riporta una breve tavola riassuntiva delle principali caratteristiche fisico-chimiche delle tre famiglie analizzate (Tabella 25).

Prodotto	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Na ₂ O %	p.a.f. %	Massa volumica apparente (kg/l)	Massa volumica in mucchio (kg/l)	Superficie specific (m ² /g)
Cenere volante	35-47	25-30	2,5-6,5	0,3-0,4	5-12	2,4	1,0	0,3-0,6
Loppa macinata	30-45	5-23	30-45	0,2-0,3	=	2,65	1,3	0,3-0,5
Fumo di silice	75-98	0,2-5	0,1-1	0,2-2	0,5-4	2,2	0,2-0,6	10-30

Tabella 25 - Dati chimico-fisici caratteristici dei principali reattivi ad azione pozzolanica.

CAPITOLO VI

IL MIX GRANULOMETRICO

Granulometria dell'aggregato misto

Viste le caratteristiche essenziali dei suoi componenti, la prima operazione che si deve effettuare per la realizzazione di un'opera in calcestruzzo, è la ricerca della sua composizione.

Questo proporzionamento non può essere derivato da un'unica formula, ma al contrario deve essere previsto in funzione delle necessità da soddisfare e tenendo conto dei mezzi a disposizione, in quanto il calcestruzzo, non può avere la stessa composizione, quando si debbano realizzare strutture fortemente armate oppure getti massivi, ecc.

Presupposti essenziali sono, comunque, il raggiungimento delle prestazioni meccaniche e della permeabilità minima, quindi della durabilità, alle quali si arriva ricercando la massima compattezza dell'impasto.

Per raggiungere questi risultati, è preliminarmente necessario un accurato studio della combinazione in peso delle particelle del cemento, dell'acqua e dei granuli degli aggregati.

Questa "sistemazione" della parte aggregato, corrisponde alla granulometria della miscela, per la quale sono state proposte numerose formule, che normalmente prendono il nome dei loro ideatori: Füller, Bolomey, Faury, ecc. Alcuni di questi studiosi sono fautori di una granulometria continua, altri di una discontinua, che prevede l'eliminazione di una classe di aggregato, e queste diverse posizioni hanno generato e generano tuttora accese discussioni, senza che si sia giunti a una definizione del metodo ideale.

È plausibile ritenere che non esista la soluzione migliore, ma che piuttosto sia da ricercare in base alle esigenze del cantiere ed soprattutto in funzione delle caratteristiche del materiale approvvigionato. Infatti sarebbe controproducente adottare una granulometria continua se manca una classe di aggregato e, al contrario, basarsi su una discontinuità avendo a disposizione un completo assortimento granulometrico (Figura 37), salvo casi specifici.

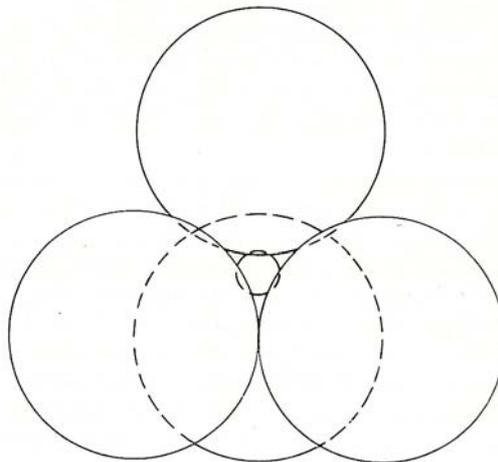


Figura 37 - Principio di una granulometria discontinua

La scelta della curva da impiegare deve poi essere guidata da un'altra esigenza estremamente importante: quella della minima richiesta d'acqua d'impasto. È stato dimostrato da Féret [1] che, a parità di compattezza, la granulometria migliore è quella che necessita, per la messa in opera del calcestruzzo, della minore quantità d'acqua d'impasto.

Quindi è indiscutibile che la scelta di una granulometria idonea debba essere concretizzata essenzialmente nel caso di cantieri impegnativi e nei quali sia garantito un accurato controllo delle forniture degli aggregati e della composizione dell'impasto. Nel caso di cantieri di piccole dimensioni, dove devono essere realizzati solo pochi metri cubi di calcestruzzo, con approvvigionamenti irregolari delle materie prime, non si potrà mai richiedere costanza e

omogeneità, con controlli sommari o inesistenti; pertanto è sempre consigliabile l'impiego di calcestruzzo preconfezionato, già controllato e certificato all'origine.

Uno studio granulometrico corretto, seleziona un dosaggio di malta esattamente calcolato per garantire una resistenza massima, che normalmente è superiore a quella prevista per le strutture da realizzare, sebbene comporti la realizzazione d'impasti di calcestruzzo difficilmente lavorabili e vibrabili, che possono generare superfici scadenti, nidi di ghiaia, zone di alta porosità, ecc. (Figura 38).



Figura 38 – Nidi di ghiaia nel calcestruzzo.

Definiti alcuni presupposti generali per lo studio granulometrico, si passa ora ad un esame dei procedimenti o, come si dice normalmente, delle granulometrie, di cui si descrivono pregi e difetti, nonché i campi d'applicabilità.

Curva di Füller

È la curva di riferimento più diffusa in Italia, anche in considerazione del fatto che su di essa si era costruita la normativa UNI 7163 - appendice A, per la costruzione dei fusi granulometrici utilizzati per la determinazione della granulometria del misto (Figura 39).

Questa curva, detta anche parabola, risponde all'equazione:

$$P = 100 \sqrt{d/D} \text{ ovvero } P = 100 (d/D)^{0,5} \quad (1.6)$$

dove P è il passante in percento di una frazione granulometrica generica di diametro d; D è il diametro massimo dell'aggregato.

Prendendo in esame una serie di setacci UNI, si ricavano i seguenti valori di P in funzione del diametro massimo D (Tabella 26):

d (mm)	P = % passante in peso				
	100√d/40	100√d/30	100√d/25	100√d/20	100√d/15
40	100,0	-	-	-	-
30	86,6	100	-	-	-
25	79,0	91,3	100,0	-	-
20	70,7	81,6	89,4	100,0	-
15	61,2	70,7	77,4	86,6	100,0
10	50,0	57,7	63,2	70,7	81,6
7	41,8	48,3	52,9	59,1	68,3
5	35,3	40,8	44,7	50,0	57,7
3	27,4	31,6	34,6	38,7	44,7
2	22,3	25,8	28,3	31,6	36,5
1	15,8	18,2	20,0	22,3	25,8
0,5	11,2	12,9	14,1	15,8	18,2
0,3	8,6	10	10,9	12,2	14,1
0,2	7,1	8,1	8,9	10,0	11,5
0,1	5,0	5,7	6,3	7,1	8,1

Tabella 26 – Valori di P in funzione del diametro massimo d.

La teoria di Füller [2], si basa sulla continuità della curva granulometrica di riferimento e quindi sul concetto che ogni classe di aggregato deve contribuire al riempimento dei vuoti lasciati dagli aggregati più grossi.

La granulometria del misto che si ottiene, è indicata in particolare per il confezionamento di calcestruzzi di normale qualità, come nel caso della produzione standard di un Preconfezionatore.

L'elemento negativo della curva teorica di Füller, come anche del fuso UNI, è che viene considerata la sola distribuzione granulometrica dell'aggregato, indipendentemente dalla sua forma, dal dosaggio di cemento e dalla consistenza del calcestruzzo. È evidente che l'assortimento ottenibile, anche con una risultante perfettamente coincidente con la curva teorica, può rivelarsi eccedente o carente di materiale fine, a seconda che sia elevato o basso il dosaggio di cemento e, di conseguenza, si potranno avere calcestruzzi con elevata richiesta di acqua o, al contrario, facilmente segregabili.

Riteniamo che questo metodo sia da adottare solo nel caso di progettazione d'impasti di calcestruzzo con dosaggio di cemento medio e quindi da 250 a 350 kg/mc ed a consistenza plastica o fluida (classi di consistenza S3 ed S4).

I limiti superiori e inferiori di ogni singolo fuso, sono espressi rispettivamente da:

$$P = 100 (d/D)^{0,65}; \quad (2.6)$$

$$P = 100 (d/D)^{0,45}. \quad (3.6)$$

Se la curva granulometrica risultante è tutta compresa nell'area delimitata dalla curva teorica di Füller e dal limite superiore del fuso, l'impasto di calcestruzzo risulta sabbioso, mentre se è tutta compresa nell'area inferiore risulta ghiaioso (Figura 58).

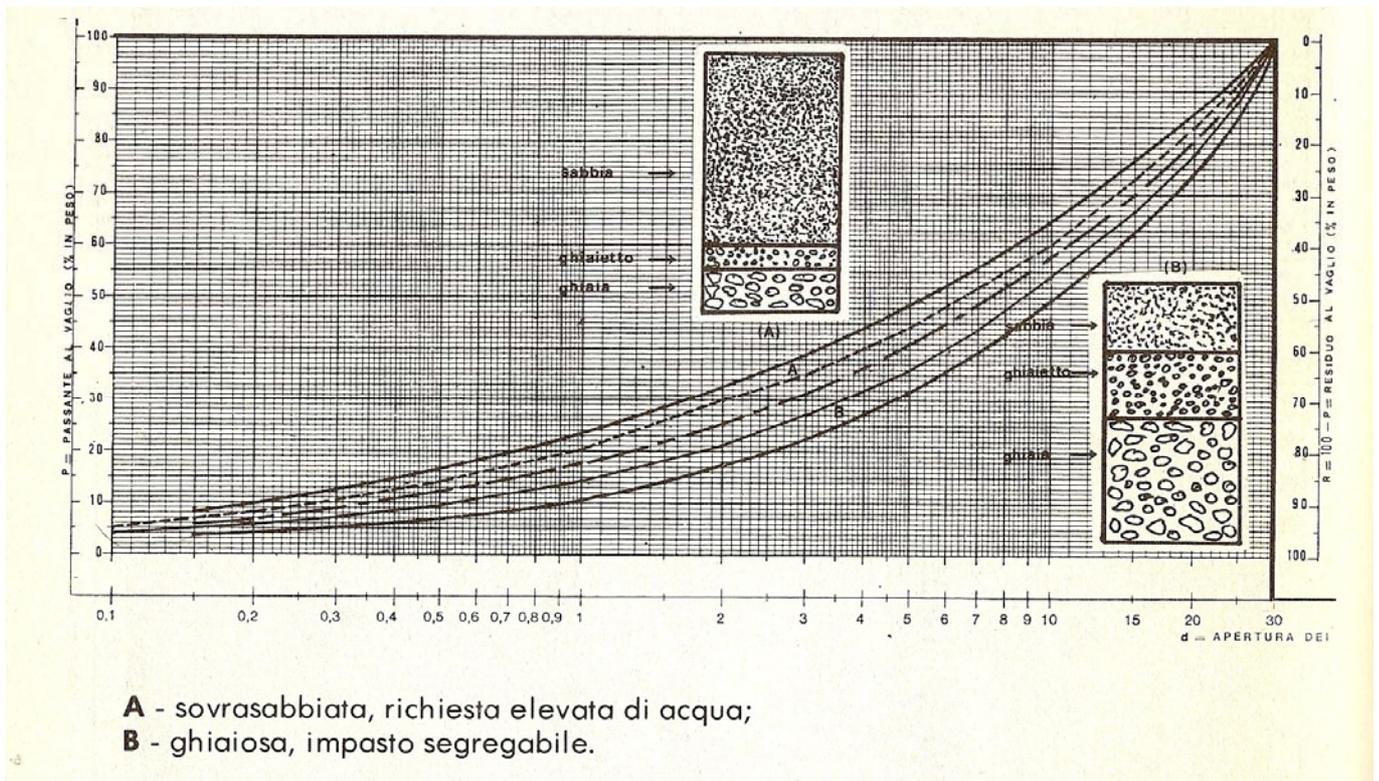


Figura 39 - Curve granulometriche (A, sovrasabbata = richiesta elevata di acqua; B, ghiaiosa = impasto potenzialmente segregabile)

Con quale procedimento si arriva alla determinazione della migliore composizione percentuale della miscela degli aggregati o, come si dice, alla granulometria del misto?

Oggi il Tecnologo dispone di tutta una serie di strumenti, come ad esempio software specifici, che consentono di raggiungere i requisiti necessari in modo estremamente semplice, con il solo inserimento dei dati di setacciatura. Sicuramente questo è un grande vantaggio per il controllo della produzione industriale, sebbene le nuove generazioni abbiano forse perso quella sensibilità che derivava dalla manualità dell'operazione e dalla rappresentazione grafica dei risultati.

Per questo motivo, si ritiene opportuna un'esemplificazione descrittiva del processo, che è necessario sia applicata da tutti gli operatori.

Come è noto l'analisi granulometrica di ogni singola classe di aggregato si effettua per mezzo della setacciatura; i valori così ottenuti sono poi rappresentati graficamente, inserendo in ordinata le percentuali di materiale passante sotto ogni vaglio o crivello ed in ascissa le aperture, in mm, del diametro o del lato della maglia degli elementi di diametro «d». Quindi si procede per approssimazioni alla determinazione delle percentuali di impiego di ogni singola classe e, di conseguenza, alla determinazione della risultante ottimale, moltiplicando i passanti di ogni singola classe di aggregato per la percentuale determinata e sommando i valori rilevati per i vuoti comuni alle varie classi.

Per chiarire il procedimento, si illustra un esempio, ricavato da una situazione reale, relativo al confezionamento di calcestruzzi prodotti da una centrale di preconfezionamento (Tabelle 27 e 28).

Classe	SABBIA			GHIAIETTO			GHIAIA		
	Σ tratt. (g)	Σ pass. (g)	% pass.	Σ tratt. (g)	Σ pass. (g)	% pass.	Σ tratt. (g)	Σ pass. (g)	% pass.
50									
40									
30							3000	100,0	
25							1020	1980	66,0
20							2010	990	33,0
15					3000	100,0	3000		
10				1320	1680	56,0			
7				2100	900	30,0			
5		2000	100,0	3000					
3	460	1540	77,0						
2	760	1240	62,0						
1	1100	900	45,0						
0,5	1400	600	30,0						
0,3	1540	460	23,0						
0,2	1660	340	17,0						
0,1	1800	200	10,0						
0,075									
FONDO									

Tabella 27 - Analisi granulometrica.

Setacci (mm)	Sabbia 40%	Ghiaietto 30%	Ghiaia 30%	Risultante 100%
30	40,0	30,0	30,0	100,0
25	40,0	30,0	19,8	89,8
20	40,0	30,0	9,9	79,9
15	40,0	30,0	-	70,0
10	40,0	16,8	-	56,8
7	40,0	9,0	-	49,0
5	40,0	-	-	40,0
3	30,8	-	-	30,8
2	24,8	-	-	24,8
1	18,0	-	-	18,0
0,5	12,0	-	-	12,0
0,3	9,2	-	-	9,2
0,2	6,8	-	-	6,8
0,1	4,0	-	-	4,0

Tabella 28 - Determinazione della risultante della curva granulometrica ottimale con il metodo matematico.

Come prima approssimazione, si può procedere anche con un metodo grafico (Figura 40); riportate le rappresentazioni di ogni classe di aggregato con le spezzate A, B, C, si congiunge il punto estremo superiore della spezzata A con il punto estremo inferiore della spezzata B. Dal punto di intersezione di questo tratto di unione con la curva teorica si può leggere, in ordinata, la percentuale relativa alla prima classe granulometrica, %A. Procedendo secondo lo stesso metodo

con le spezzate B e C si determina il valore %B, ottenuto per differenza tra il valore dell'intersezione rilevato in ordinata con il valore di %A; infine per differenza a 100% si ricava il valore %C.

Ovviamente è molto difficile, nella realtà, che la granulometria di ciascuna classe di aggregato sia perfettamente graduale e che le classi granulometriche non si sovrappongano tra di loro. In questo caso, il metodo grafico è da considerare puramente orientativo o di prima approssimazione e successivamente deve essere completato con il metodo matematico.

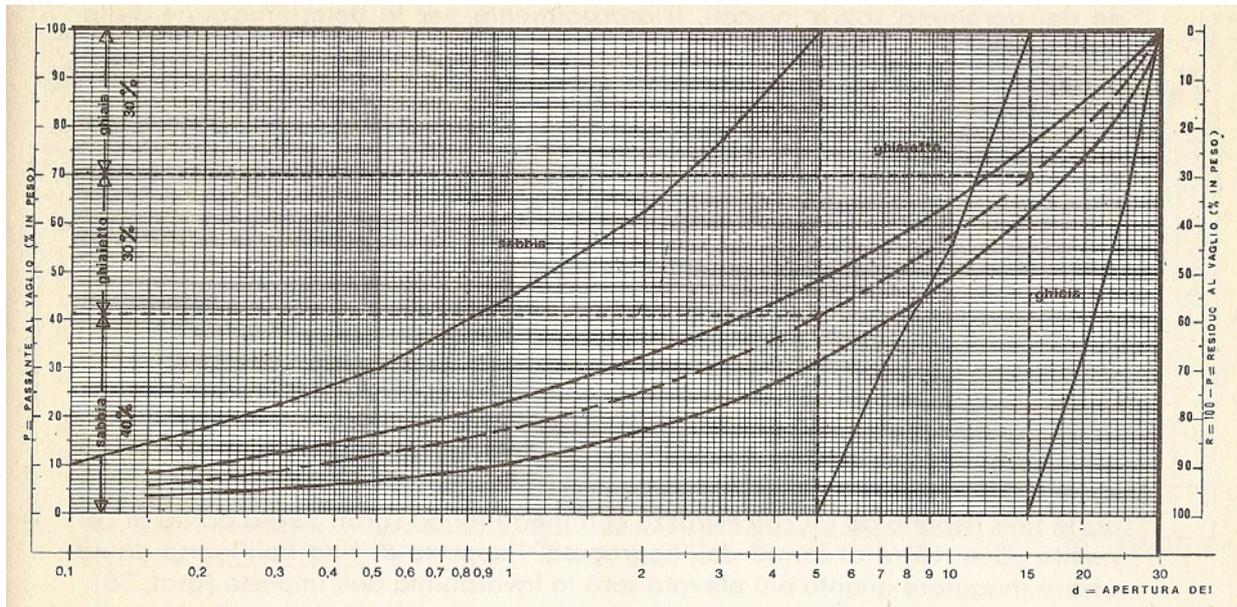


Figura 40 - Determinazione della risultante con il metodo grafico

Curva di Bolomey

Anche questa curva di riferimento è basata sul principio della granulometria continua ma diversamente da quella di Füller, prende in considerazione non solo la distribuzione degli aggregati ma anche il dosaggio di cemento e la consistenza del calcestruzzo [3].

La curva di Bolomey risponde all'equazione:

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D}; \tag{4.6}$$

oppure

$$P = [A - C + (100 - A) \sqrt{d/D}] \times 100 / 100 - C; \tag{5.6}$$

dove A è un coefficiente, variabile in funzione della forma dell'aggregato e della consistenza dell'impasto, secondo quanto riportato in Tabella 29; C è la percentuale in peso del cemento sul peso della parte solida del calcestruzzo (cemento più aggregato), che normalmente si considera pari a 2.200 kg/mc.

Forma aggregato	Consistenza calcestruzzo	A
tonda	asciutta	4 ÷ 8
tonda	plastico-fluida	8 ÷ 10
tonda	superfluida	10 ÷ 12
frantumata	asciutta	6 ÷ 10
frantumata	plastico-fluida	12 ÷ 14
frantumata	superfluida	14 ÷ 16

Tabella 29 – Valori del coefficiente A.

Generalmente si ritiene preferibile adottare la seconda equazione, in quanto, una volta tracciata la curva teorica di riferimento, che varia in funzione dei parametri sopra indicati, il procedimento per la determinazione della migliore composizione granulometrica è del tutto simile a quello indicato da Füller.

La curva di Bolomey, d'impiego non comune in Italia, è quella che maggiormente si adatta alla progettazione di calcestruzzi con ridotta permeabilità e con dimensione massima dell'aggregato sino a 60 mm, in quanto consente un assiduo controllo del quantitativo della malta contenuta nell'impasto. Il calcestruzzo confezionato risulta ben compattabile e quindi consente di raggiungere anche elevate resistenze meccaniche.

A parità di consistenza del calcestruzzo ($A = 10$), ad un aumento del dosaggio di cemento corrisponde un appiattimento della curva teorica, nella fascia dei fini (Figura 41); a parità di dosaggio di cemento ($C = 15$) e di consistenza, con aggregato frantumato è necessario un quantitativo maggiore di parte fine, rispetto ad un calcestruzzo con aggregato tondo (Figura 42); a parità di cemento ($C = 15$) e di forma dell'aggregato, l'apporto di fine dall'aggregato deve essere tanto maggiore quanto più elevata è la lavorabilità dell'impasto (Figura 43).

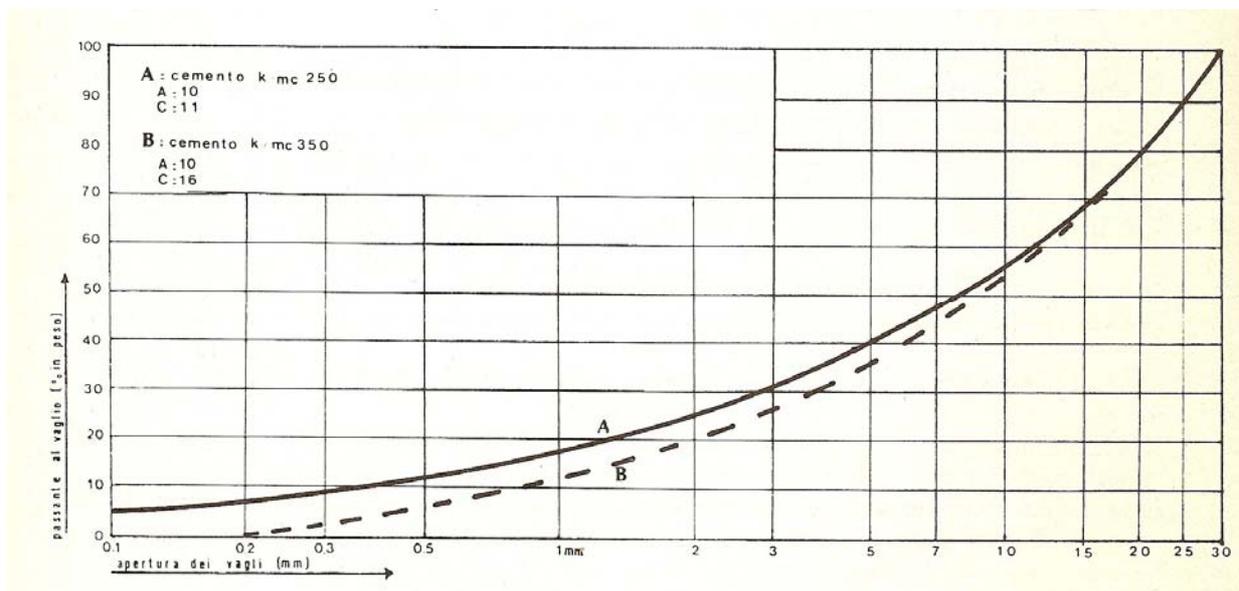


Figura 41 - Curva di Bolomey - variazione della curva in funzione della variazione del dosaggio di cemento

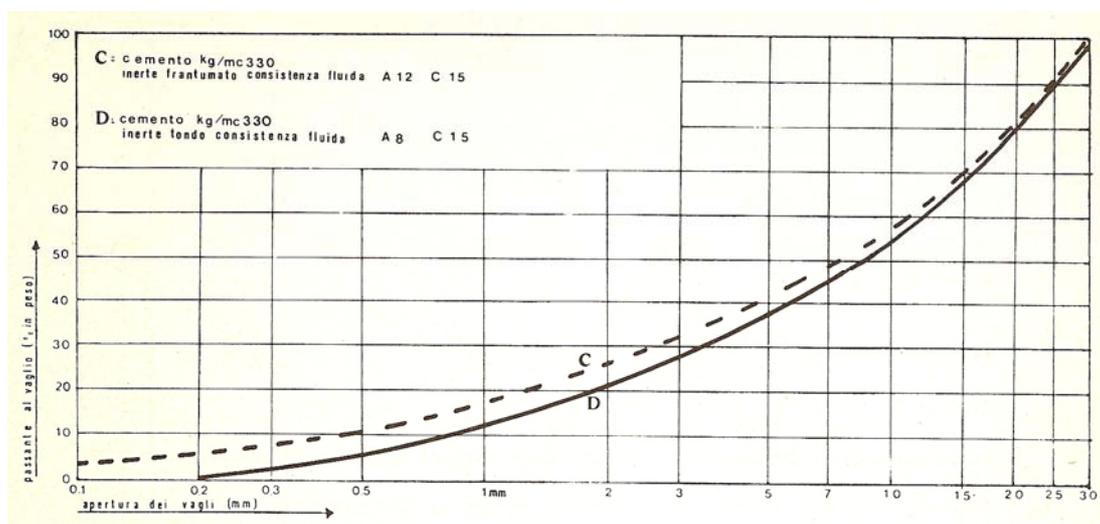


Figura 42 - Curva di Bolomey - variazione della curva in funzione della forma dell'aggregato

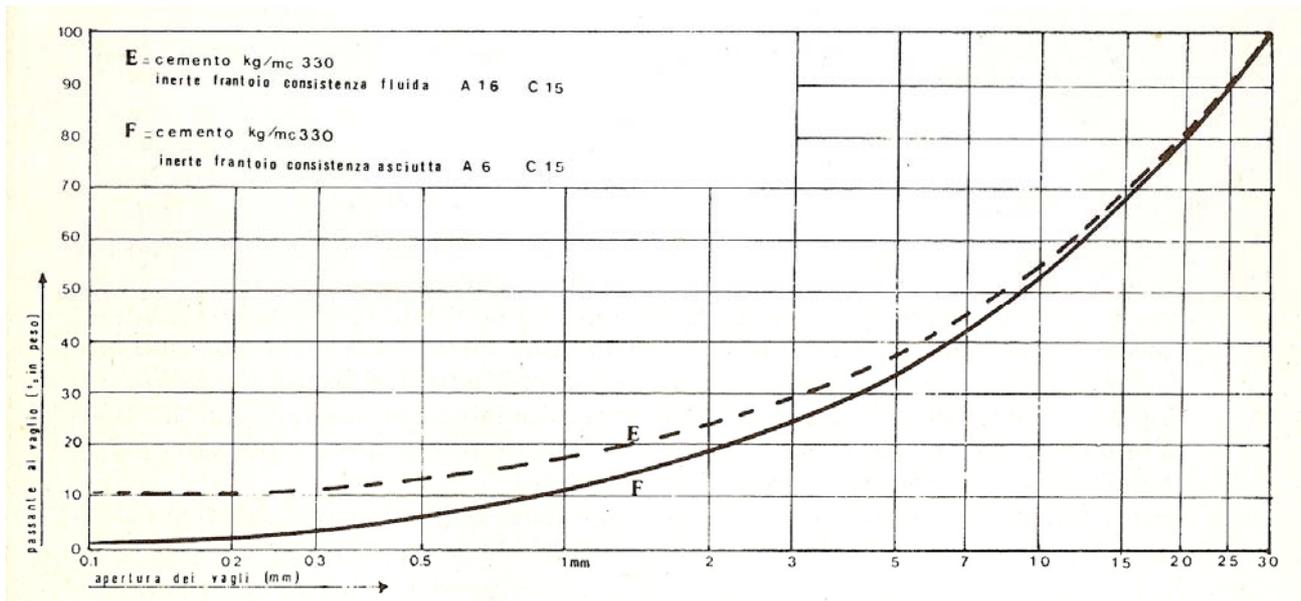


Figura 43 - Curva di Bolomey - variazione della curva in funzione della consistenza dell'impasto

Curva cubica

Viene utilizzata quasi esclusivamente per la determinazione della migliore composizione granulometrica di calcestruzzi massivi per dighe, ecc. e con aggregati con D_{max} superiore a 100 mm. Risponde all'equazione:

$$P = 100 \sqrt[3]{d/D} \quad (6.6)$$

e si riferisce alla miscela aggregati + cemento (Figura 44).



Figura 44 - Curva cubica - Scala $\sqrt[3]{d/D}$

Curva di Faury

È l'unica che inserisce, in ordinata, non le percentuali in peso dei passanti ai vagli, bensì le percentuali passanti in volume assoluto [4]. Secondo Faury, il calcestruzzo deve essere considerato, per i componenti solidi, come un composto di due miscugli distinti e cioè quello degli aggregati fini e medi, con dimensione inferiore a $D_{max}/2$ e quello compreso tra $D_{max}/2$ e D_{max} effettivo.

È essenziale stabilire la proporzione di miscelazione dei due miscugli in funzione della natura degli aggregati, del loro D_{max} , delle modalità di posa in opera e della distanza media tra i ferri d'armatura.

Faury fornisce la percentuale, in volume assoluto, degli elementi con dimensione inferiore a $D_{max}/2$, che chiamiamo Y, secondo la equazione:

$$Y = A + (17 \sqrt[5]{D}) + B / (R/D) - 0,75 \quad (7.6)$$

dove R è la distanza media tra i ferri dell'armatura e, analogamente al diametro massimo D, è espresso in mm; A e B sono coefficienti dipendenti, il primo dalla natura degli aggregati e dalle modalità di messa in opera, il secondo dalle sole modalità di messa in opera.

Il valore B varia da 1,5 ad 1, passando da una normale vibrazione del calcestruzzo ad una molto energica. La percentuale di aggregati con diametro inferiore a $D_{max}/2$ cresce quando, per l'aumento di D, dell'effetto parete e degli aggregati frantumati rispetto a quelli tondi, nonché per la diminuita efficacia della messa in opera, aumentano le difficoltà di assestamento del calcestruzzo. La granulometria deve variare con $\sqrt[5]{d}$ anche per la componente tra $D_{max}/2$ e D_{max} , che quindi è rappresentata dal segmento VW. Pertanto i segmenti UV e VW corrispondono alla curva granulometrica di riferimento, che normalmente è una spezzata.

Secondo Faury, in un volume di calcestruzzo fresco in opera, i cui componenti solidi sono assortiti rispettando la curva granulometrica di riferimento, il volume "I" non occupato dai componenti solidi, quindi quello dell'acqua e dei vuoti, è dato da:

$$I = (K/\sqrt[5]{d}) + K'/R/D_{max} - 0,75 \quad (8.6)$$

dove R e D_{max} sono espressi in millimetri e K e K' sono coefficienti numerici analoghi ad A e B.

Pertanto la differenza 1-I fornisce il volume assoluto dei componenti solidi in un mc di impasto.

Per la determinazione delle varie fasce granulometriche, Faury ha fissato il concetto secondo il quale ogni classe ha, nei riguardi del miscuglio che contiene elementi delle stesse classi, un suo particolare peso, che può essere caratterizzato da un numero, detto anche "indice ponderale".

Questi indici, riferiti ad una vagliatura con stacci a foro tondo, sono riportati in Tabella 30:

\varnothing (mm)	Indice ponderale
< 0,1	1,00
0,1 ÷ 0,4	0,79
0,4 ÷ 1,6	0,69
1,6 ÷ 6,3	0,39
6,3 ÷ 12,5	0,24
12,5 ÷ 25,0	0,16
25,0 ÷ 50,0	0,10
50,0 ÷ 100,0	0,04

Tabella 30 – Indice ponderale.

L'indice ponderale di un miscuglio equivale alla somma dei prodotti delle percentuali in volume assoluto degli elementi delle varie classi che lo compongono, moltiplicato per gli indici delle classi utilizzate. Per esempio, se un miscuglio è composto per il 20% da materiale inferiore ai 0,1 mm, per il 32% tra 0,4 ed 1,6 e per il 48% tra 6,3 e 12,5, il suo indice ponderale è uguale a:

$$(0,20 \times 1) + (0,32 \times 0,69) + (0,48 \times 0,24) = 0,536 \quad (9.6)$$

Pertanto è evidente che due miscugli di uguale volume assoluto si equivalgono, se hanno uguali indici ponderali. Definite C_1 , S_1 , P_1 le percentuali dei volumi assoluti del cemento, della sabbia e del pietrisco, rispetto al volume assoluto dei componenti solidi, si ricava che:

$$C_1 + S_1 + P_1 = 1 - I \quad (10.6)$$

Poiché il volume assoluto del cemento è dato, normalmente, da $C/3,1$ si ha:

$$(a) C_1 = (C/3,1)/1 - I \quad (11.6)$$

e quindi:

$$S_1 + P_1 = 1 - [(C/3,1)/1 - I] \quad (12.6)$$

Questa è la prima relazione tra S_1 e P_1 ; per ottenerne una seconda, l'indice ponderale del miscuglio deve equivalere all'indice del miscuglio rappresentato dalla curva di riferimento, ir. Indicando con i_s ed i_p gli indici ponderali della sabbia e del pietrisco e ricordando che l'indice ponderale del cemento è 1, si ricava che:

$$(b) (C_1 \times 1) + (S_1 \times i_s) + (P_1 \times i_p) = ir \quad (13.6)$$

Il sistema costituito dalla (a) e (b) consente di determinare i valori di S_1 e P_1 e quindi la composizione di un mc di calcestruzzo corrisponde a:

Cemento - C (in kg)
 Sabbia - $S_1 \times (1 - I) \times \pi'$ ass. (in kg)
 Pietrisco - $P_1 \times (1 - I) \times \pi''$ ass. (in kg)
 Acqua - $(1 - I)$ (in kg).

dove π ass. equivale al peso specifico assoluto dell'aggregato.

Il metodo di Faury, sebbene dal punto di vista concettuale sia tra i più avanzati, viene considerato comunque eccessivamente specializzato, essendo influenzato dalla forma dei casseri e dalla densità dell'armatura e pertanto risulta più appropriato per produzioni di carattere industriale, quali quelle per prefabbricati, ben costipabili e di tipo ripetibile..

Metodi diversi

Oltre ai quattro metodi di proporzionamento citati poc'anzi ne esistono altri, alcuni dei quali normalizzati dalle legislazioni tedesche, inglesi, americane, svizzere, ecc.

A questo proposito si ricorda, per esempio, il metodo mediante il modulo di finezza dei singoli componenti con riferimento alla curva di Füller, la curva granulometrica SIA, quella di Vallette [5] e quella per il misto secondo le norme DIN (Figura 45).

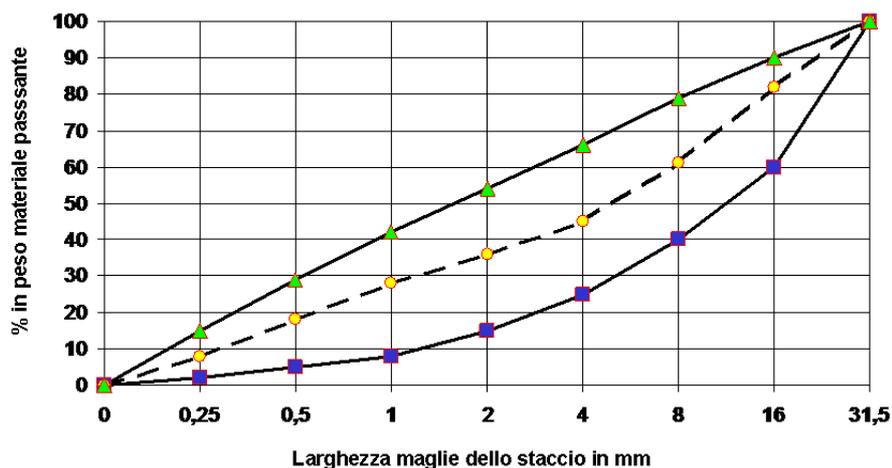


Figura 45 - Curva DIN.

Riferimenti bibliografici

- [1] – Féret,
- [2] – Füller, in E. Dosaggio
- [3] – Bolomey, in R. L'Hermite
- [4] – Faury, in E. Dosaggio
- [5] – Vallette, in E. Dosaggio

CAPITOLO VII

IL PROPORZIONAMENTO DELL'IMPASTO DI CALCESTRUZZO

Il proporzionamento

Il mix design o progettazione della miscela di calcestruzzo, è l'operazione attraverso la quale vengono proporzionati i componenti del conglomerato cementizio, con lo scopo di conseguire, con i materiali a disposizione, le prescrizioni di progetto sia per la statica, quindi le resistenze meccaniche, sia, e soprattutto, per la sua resistenza nei confronti dell'aggressione ambientale, quindi la durabilità.

I componenti di un calcestruzzo normale possono variare, sia in qualità che in quantità; la progettazione della miscela o mix design; il mix design consiste nel determinare in quali proporzioni dosare i diversi costituenti, tenendo conto delle caratteristiche progettuali e funzionali della struttura da realizzare e delle condizioni operative nel cantiere.

Lo studio delle miscele, si riferisce sostanzialmente ad una valutazione/compromesso tra l'esigenza di prestazione del Progettista (resistenza e durabilità) e la scelta di materiali idonei e facilmente reperibili in loco.

Si ritiene che il metodo di proporzionamento più valido e affidabile, sia quello che parte dai volumi assoluti dei singoli componenti dell'impasto; il procedimento deriva dal presupposto che il volume del calcestruzzo fresco, compattato in opera, sia uguale alla somma dei volumi assoluti dei vari componenti compresa l'aria, inglobata sia naturalmente che mediante l'impiego di un opportuno additivo aerante (Figura 46).

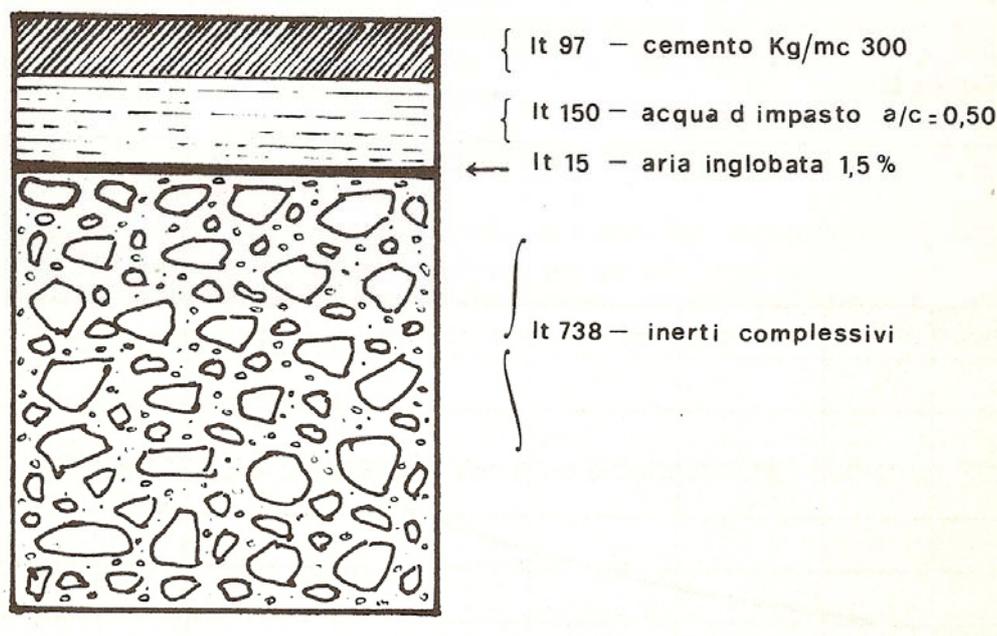


Figura 46 - Composizione di un metro cubo di calcestruzzo compattato, in funzione dei volumi assoluti dei componenti

Per un calcolo corretto, è essenziale la conoscenza di:

- ✚ granulometria dell'aggregato misto;
- ✚ dosaggio di cemento per mc d'impasto;
- ✚ quantitativo d'acqua d'impasto o del rapporto a/c .

Per determinare questi valori, in particolare il dosaggio di cemento ed il rapporto a/c , si devono valutare attentamente:

- ✚ le condizioni generali del lavoro;

- ✚ i mezzi a disposizione per la messa in opera e compattazione del calcestruzzo;
- ✚ le dimensioni della struttura e la densità dell'armatura;
- ✚ le resistenze meccaniche alle varie stagionature;
- ✚ il tipo e classe di cemento a disposizione;
- ✚ il diametro massimo dell'aggregato, la sua forma e la superficie dei granuli.

Al fine di consentire, già nella fase di studio preliminare della miscela, l'inserimento di un corretto quantitativo d'acqua d'impasto, si riassumono i valori in funzione del diametro massimo, della forma dell'aggregato e della consistenza del calcestruzzo (Tabella 31).

D _{max} aggregato	Forma	Classe di fluidità				
		S1 terra umida	S2 semiplastica	S3 plastica	S4 fluida	S5 superfluida
15	t	160	180	200	220	240
	f	180	200	220	240	260
20	t	150	170	190	210	230
	f	170	190	210	230	250
30	t	140	160	180	200	220
	f	160	180	200	220	240
50	t	130	150	170	190	210
	f	150	170	190	210	230

Tabella 31 - Fabbisogno d'acqua nel calcestruzzo senza additivo, in funzione della classe di fluidità, della forma e del D_{max} dell'aggregato (t = tondo; f = frantumato), espressa in un litro per metro cubo (Acqua totale aggiunta, con aggregato S.S.A. (Saturo a superficie asciutta)).

Seguendo questo metodo, una volta definiti i parametri di partenza e quindi:

- ✚ dosaggio di cemento per mc di impasto;
- ✚ rapporto a:c;
- ✚ contenuto d'aria per mc d'impasto;

si procede alla determinazione dei singoli volumi assoluti dei componenti e, per differenza a 1000 litri, quello dell'aggregato misto. Indicando con:

- ✚ V.t il volume assoluto di un mc di calcestruzzo compattato, che è pari a 1000 litri;
- ✚ V.c il volume assoluto del cemento in litri;
- ✚ V.ar il volume dell'aria inglobata in litri;
- ✚ V.a il volume dell'acqua d'impasto in litri;
- ✚ V.ag il volume assoluto dell'aggregato misto in litri;

si ricava che:

$$V.t = V.c + V.ar + V.a + V.ag \quad (1.7)$$

e quindi, essendo noti Vc, Var e Va:

$$V.ag = V.t - (V.c + V.ar + V.a) = 1000 - (V.c + V.ar + V.a) \quad (2.7)$$

Noto il volume assoluto dell'aggregato misto "V.ag", si moltiplica questo valore per il peso specifico relativo del misto, ottenendo il peso della miscela degli aggregati saturi a superficie asciutta "P.ag".

Avendo determinato, precedentemente, le percentuali di ogni singola classe di aggregato rispetto al misto, è possibile calcolarne i relativi pesi. Supponendo di avere tre classi di aggregato, ag₁, ag₂ e ag₃, i rispettivi pesi per mc d'impasto sono:

$$P.ag_1 = \%ag_1 P.ag; \quad (3.7)$$

$$P.ag_2 = \%ag_2 P.ag; \quad (4.7)$$

$$P.ag_3 = \%ag_3 P.ag. \quad (5.7)$$

Per esempio se si dispone di un calcestruzzo con aggregato tondo, D_{max} 30 mm, cemento dosato in ragione di 300 kg/mc, rapporto a/c previsto = 0,50 con inglobamento dell'1,5% di aria, i volumi assoluti degli elementi noti sono (per mc compattato):

- ✚ cemento = $300 \text{ kg} / 3,1 \text{ l} = 97 \text{ l}$;
- ✚ acqua, con a/c 0,50 = $300 \times 0,5 = 150 \text{ l/kg}$;
- ✚ aria, 1,5% di 1000 l = 15 l.

Il volume assoluto della pasta cementizia equivale a:

$$l (97 + 150 + 15) = 262 \text{ l}$$

per cui il volume assoluto dell'aggregato misto è:

$$l (1000 - 262) = 738 \text{ l.}$$

Dall'analisi granulometrica di cui si è riferito nel capitolo VI, il mix di aggregato è:

Classe aggregato	% d'impiego	Peso spec. kg/l
Sabbia	40	2,658
Ghiaietto	30	2,694
Ghiaia	30	2,704

Il peso specifico dell'aggregato misto P.ag è:

$$P.ag = (0,4 \times 2,658) + (0,3 \times 2,694) + (0,3 \times 2,704) = 2,682 \text{ kg/l.}$$

Noto il valore di P.ag, si determina il peso totale dell'aggregato (P.agt), per mc di calcestruzzo:

$$P.agt = \text{kg} (2,682 \times 738) = 1.979,3 \sim 1.980 \text{ kg}$$

di aggregato saturo a superficie asciutta (S.S.A.).

In linea generale, lo studio compositivo si deve orientare verso:

- ✚ il conseguimento della necessaria fluidità e resistenza del calcestruzzo, con il minor quantitativo possibile di pasta cementizia e, di conseguenza, la maggiore quantità possibile di scheletro rigido, cioè l'aggregato;
- ✚ attribuzione della priorità al parametro "durabilità", onde garantire la vita utile della struttura in calcestruzzo o in cemento armato, senza apprezzabile decadimento delle prestazioni funzionali del conglomerato cementizio e conseguentemente:
- ✚ valutare l'impiego di idonei cementi non reattivi o, in carenza, di migliorativi ad azione pozzolanica, con cementi ordinari;
- ✚ ridurre al massimo la quantità totale dell'acqua d'impasto;
- ✚ ridurre i rischi di fessurazione conseguente al ritiro igrometrico;
- ✚ ridurre la permeabilità della pasta cementizia nei confronti dell'acqua e dei gas aggressivi.

I parametri essenziali sui quali ci si deve basare sono:

- ✚ tipo e classe di cemento adottato;
- ✚ dimensione massima dell'aggregato;
- ✚ classe di consistenza dell'impasto;
- ✚ classe di resistenza per calcestruzzo indurito;
- ✚ classe di esposizione;

per sviluppare il mix design, si opera seguendo uno schema a flussi d'informazione:

- ✚ flusso resistenza meccanica;
- ✚ flusso condizioni operative;
- ✚ flusso durabilità.

Determinato il rapporto a/c più basso tra quello individuato per la resistenza e quello per la durabilità, si ottiene il dosaggio di cemento e, attraverso la preventiva analisi degli aggregati e la scelta degli opportuni additivi, la composizione finale della miscela (Figura 47).

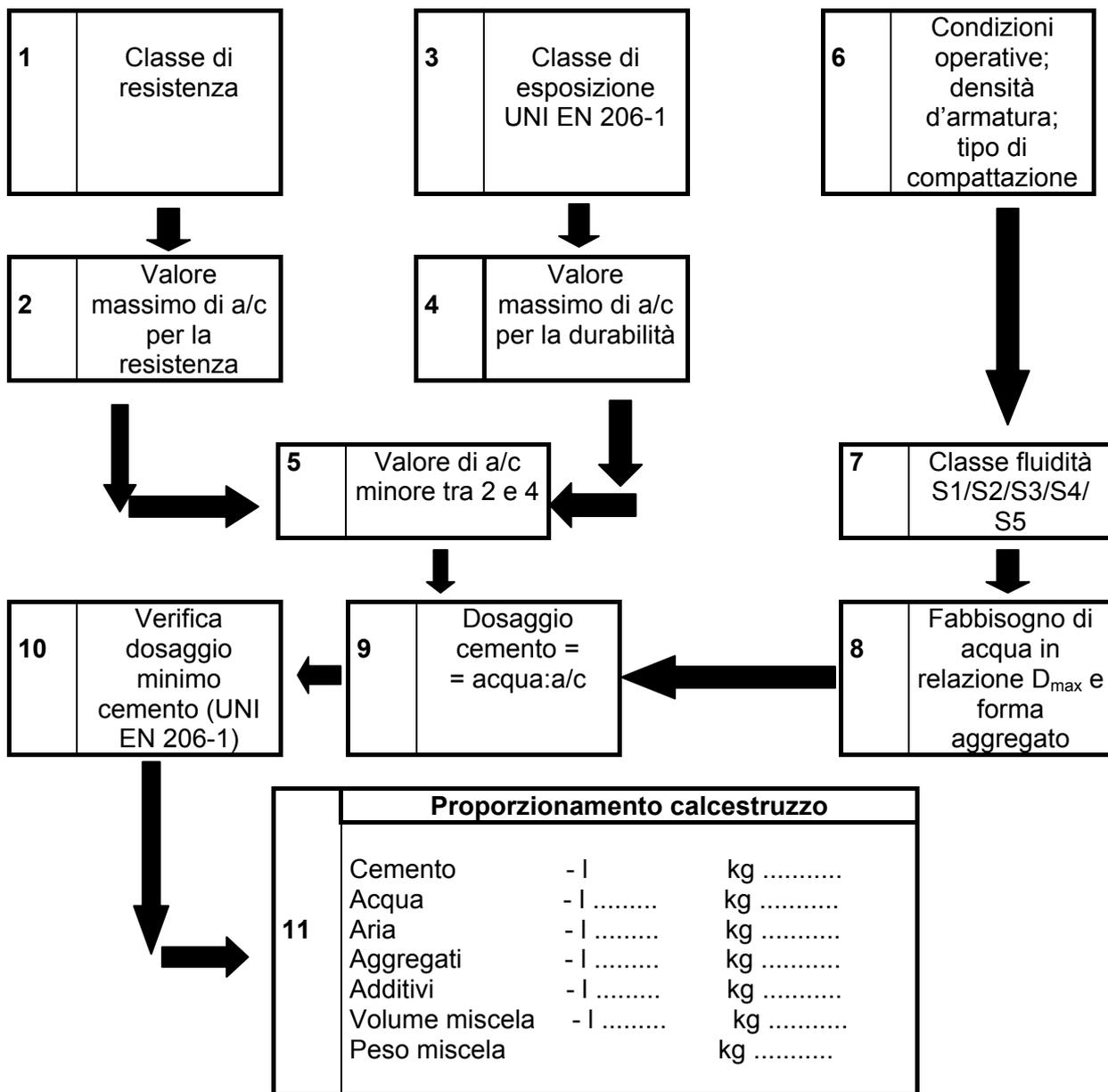


Figura 47 - Schema funzionale di un processo di proporzionamento del calcestruzzo (mix-design) con prelazione sulla durabilità.

A - Esempio di calcolo del proporzionamento del calcestruzzo: input di calcolo

A.1 - Informazioni indispensabili dal progettista e dalla UNI EN 206-1:

- ✚ **Casella 1** - classe di resistenza per il calcolo statico = **C 25/30**;
- ✚ **Casella 3** - classe di esposizione = **XC4** per rischio di corrosione da carbonatazione con prescrizioni prestazionali e composizionali minime da UNI EN 206-1: **C 30/37** con dosaggio di cemento minimo di **300 kg/mc**;
- ✚ **Casella 4** - a/c massimo per la durabilità in classe di esposizione XC4 (UNI EN 206-1) = **0,50**;
- ✚ **Casella 6** - messa in opera con **pompa**; densità d'armatura **elevata**; compattazione con **vibrazione meccanica**;
- ✚ **Casella 7** - classe di fluidità (consistenza) = **S4**.

A.2 - Informazioni supplementari:

- ✚ cemento da utilizzare: **CEM I 42.5**;
- ✚ aggregato: forma **frantumata**, D_{max} **30 mm**.

B - Area calcolo rapporto a/c e dosaggio cemento

Facendo riferimento allo schema della Figura 47, le operazioni da eseguire sono:

- B.1 - inserire i dati fissi disponibili nelle relative caselle:
 ✚ casella 1 (classe resistenza);
 ✚ casella 3 (classe esposizione);
 ✚ casella 6 (condizioni operative);
 ✚ casella 7 (classe di fluidità);
- B.2 - calcolare il valore di a/c per la resistenza (casella 2) utilizzando la Tabella 32; nel caso specifico si legge che, con cemento classe 42,5 e per classe resistenza C25/30, il rapporto a/c massimo deve essere pari a 0,56;
- B.3 - leggere, da casella 4, il valore di a/c per la durabilità che, nel caso specifico, è pari 0,50;
- B.4 - nella casella 5, scrivere il valore più basso tra quelli di a/c indicati in casella 2 ed in casella 4, quindi a/c = 0,50;
- B.5 - scrivere il fabbisogno d'acqua d'impasto per confezionare un calcestruzzo S4 (slump tra 160 e 200 mm), attraverso esperienza diretta o, in carenza, utilizzando la Tabella 30; nel caso specifico si legge che, per aggregati frantumati D_{max} 30 mm, un fabbisogno di 220 l d'acqua per mc di miscela;
- B.6 - a questo punto, si può calcolare il dosaggio di cemento, che è dato da:
 Acqua (in kg): a/c
 Nel caso specifico, il rispetto della classe di resistenza sarebbe assicurato da:
 ✚ kg $(220:0,56) = 390$ kg/mc;
 ma poiché la priorità è sempre la durabilità, si deve considerare un rapporto a/c massimo pari a 0,50; di conseguenza il dosaggio di cemento è:
 ✚ kg $(220:0,50) = 440$ kg/mc;
- B.7 - verificare che il dosaggio di cemento trovato sia uguale o superiore a quello minimo indicato dalla UNI EN 206-1; nello specifico si legge che, per classe esposizione XC4, un dosaggio minimo 300 kg/mc). In caso positivo, passare alla seconda fase del proporzionamento.

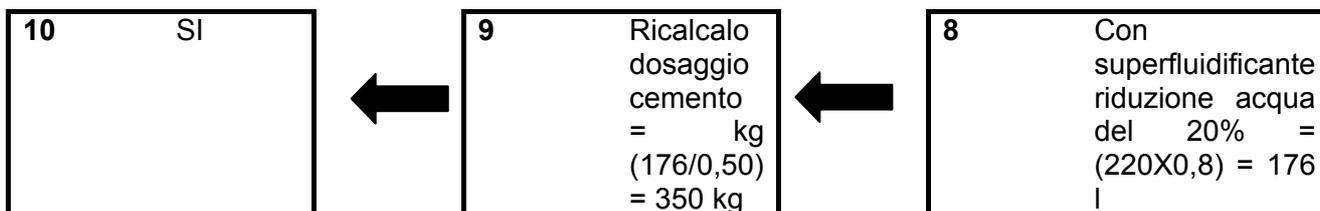
Rc	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
Classe cemento	a/c max							
32.5	0,71	0,56	0,47	0,38	=	=	=	=
42.5	0,85	0,68	0,56	0,46	0,38	0,34	0,31	=
52.5	=	0,80	0,67	0,54	0,44	0,40	0,36	0,33

Tabella 32 - Valore massimo di a/c per il raggiungimento di una determinata classe di resistenza del calcestruzzo, in relazione alla resistenza del cemento ed al fabbisogno d'acqua.

C - Area di calcolo proporzionamento

A questo punto, interviene il Tecnico con la proposta d'impiego di un idoneo additivo superfluidificante, che consente una riduzione normale dell'acqua d'impasto del 20%.

La parte finale dello schema di Figura 59 diventa pertanto:



Nel caso d'impiego di un superfluidificante, saranno questi i due valori da utilizzare per il successivo proporzionamento:

- 🚧 cemento CEM I - tipo 42,5 = 350 kg/mc;
- 🚧 acqua d'impasto (a/c = 0,50) = 176 l/mc.

C.1 - Esempio di calcolo per il proporzionamento del calcestruzzo

Il proporzionamento consiste nella valutazione dei rapporti di miscela dei diversi componenti del calcestruzzo, caratterizzati da diversi pesi specifici dei granuli (detti anche pesi specifici relativi) e quindi da diversi rapporti volume/peso, tali da portare a una miscela nella quale il dosaggio di cemento prefissato, sia riferito a 1 mc di calcestruzzo compattato.

Quindi è evidente che il dosaggio di legante deve riferirsi a 1000 l di conglomerato cementizio vibrato sino ad incipiente rifluimento della boiaccia.

Nota: pesi specifici relativi caratteristici dei componenti del calcestruzzo

cemento	=	2,90 ÷ 3,10 kg/l
aria	=	----- ÷ ----- kg/l
aggregato	=	2,60 ÷ 2,70 kg/l
additivo	=	1,05 ÷ 1,20 kg/l
aggiuntivo	=	2,10 ÷ 2,40 kg/l

A questo proposito si ricorda che i dati finali delle due miscele (per mc), con e senza superfluidificante sono:

A senza additivo	Componente	B con superfl.
440 kg	Cemento	350 kg
220 l	Acqua	176 l

Altri dati comuni per le due miscele sono:

- 🚧 peso specifico cemento: 3,05 kg/l;
- 🚧 peso specifico aggregato: 2,65 kg/l;
- 🚧 aria inglobata: 2%.

Si ricorda inoltre che la migliore composizione granulometrica è calcolata in:

- 🚧 sabbia: 40%
- 🚧 pietrischetto: 30%
- 🚧 pietrisco: 30%

C.2 - Esempio di calcolo: miscela A, senza superfluidificante, per mc di calcestruzzo compattato

Componente	Volumi (l)	P.sp (kg/l)	Masse (kg)
Cemento kg 440/litri 3,05	144	3,05	440
Acqua	220	1,00	220
Aria (2%)	20	0,00	=
1 – Totale pasta cementizia	384	-	660
2 – Totale aggregato l (1000 – 384) = l	616	2,65	1.632

Volume totale del calcestruzzo compattato, litri 1.000 (dati da 384 + 616), per un peso del calcestruzzo fresco di 2.292 kg/mc (dato da 660 + 1.632).

C.3 - Esempio di calcolo: miscela B, con superfluidificante, per mc di calcestruzzo compattato

Componente	Volumi (l)	P.sp (kg/l)	Masse (kg)
Cemento kg 380/litri 3,05	115	3,05	350
Acqua	176	1,00	176
Aria (2%)	20	0,00	=
1 – Totale pasta cementizia	311	-	526
2 – Totale aggregato l (1000 – 311) = l	689	2,65	1.826

Volume totale del calcestruzzo compattato, litri 1.000 (dati da 311 + 689), per un peso del calcestruzzo fresco di 2.352 kg/mc (dato da 526 + 1.826).

C.4 - Confronto tra le miscele A e B, senza e con superfluidificante, ed analisi delle prestazioni

Miscela A – senza additivo		Miscela B – con superfluidificante
440 kg	Cemento	350 kg
220 kg	Acqua	176 kg
1.632 kg (di cui)	Aggregati totali	1.826 kg (di cui)
653 kg	Sabbia 40%	731 kg
489 kg	Pietrischetto 30%	547 kg
490 kg	Pietrisco 30%	548 kg
0 kg	Superfluidificante	3,8 kg

Miscela A		Miscela B
2.292 kg	Peso totale del calcestruzzo fresco	2.352 kg
0,50	Rapporto a/c	0,50
3,7:1	Rapporto i/c	5,2:1
960 µ/m	Ritiro igrometrico	580 µ/m

Nota: i/c = rapporto aggregato : cemento

A parità di a/c, più questo rapporto è elevato, tanto più ridotto è il ritiro igrometrico del calcestruzzo, per effetto del minor volume di pasta cementizia nel conglomerato. Nell'esempio di cui sopra, un aumento di i/c del 40% porta ad una corrispondente riduzione del ritiro igrometrico del 40%.

Una volta determinata la composizione teorica di un calcestruzzo, cioè il suo mix design, si provvede al confezionamento di un impasto sperimentale, al fine di verificare i valori definiti e apportare le eventuali correzioni.

Ovviamente esistono anche altri metodi per il proporzionamento delle miscele di calcestruzzo, che partono da diversi concetti; a questo proposito qui di seguito si riportano alcuni brevi cenni.

Metodo anglosassone

Stabilisce le dosi dei vari componenti per mezzo di numeri semplici, per esempio adottando un rapporto 1:2:3, con cui sono indicati rispettivamente i volumi del cemento, della sabbia e della ghiaia, quest'ultimi in particolare considerati costipati ed allo stato asciutto.

Metodo americano del rapporto a/c o di Abrams

Si collega alla legge fondamentale di Abrams [1], con la quale si dimostra la relazione che intercorre tra il valore della resistenza alla compressione di un calcestruzzo ed il rapporto a/c (97) ed inoltre la non dipendenza (o meglio la ridotta dipendenza) di questa resistenza dalla quantità e granulometria dell'aggregato impiegato.

Questo metodo è stato adottato dall'American Concrete Institute (A.C.I.) nel 1928, per prescrizioni del calcestruzzo semplice ed armato e fornisce i valori delle resistenze delle rotture a compressione su provini cilindrici.

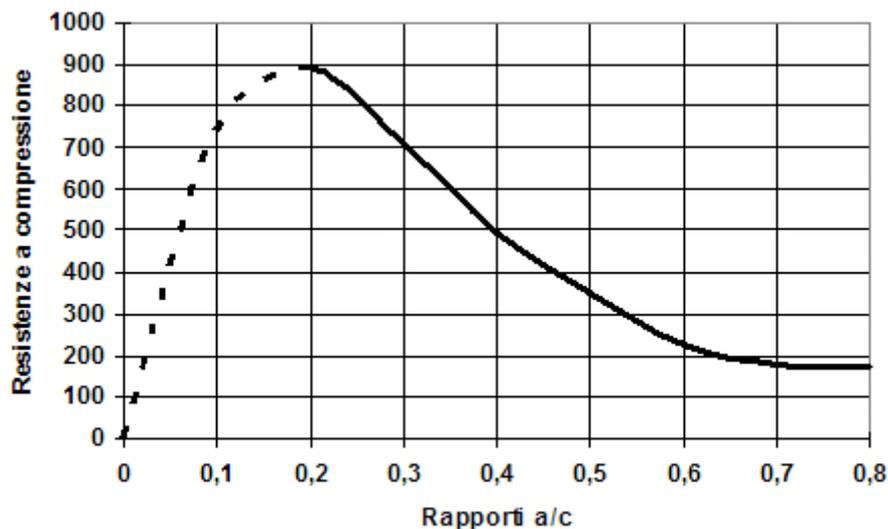


Figura 48 - Legge di Abrams.

Le dosi dei vari componenti dell'impasto, sono fissate riferendosi alla resistenza a compressione che il calcestruzzo deve raggiungere ed al suo grado di consistenza, determinato in base al tipo di costruzione ed alla intensità della vibrazione (Figura 49). Per esemplificare il procedimento, si ipotizza di dover procedere alla costruzione di un edificio industriale che, per le strutture portanti preveda, in base ai calcoli, un carico di rottura a compressione di 26,5 N/mm² a 28 giorni di stagionatura; l'aggregato grosso abbia un D_{max} 40 mm, con umidità superficiale dell'1% e peso specifico relativo di 2,65 kg/dmc; la sabbia sia naturale e abbia un modulo di finezza di 2,50, con umidità superficiale del 3% e peso specifico relativo identico a quello dell'aggregato grosso; infine, che si debba confezionare un calcestruzzo a consistenza plastica e quindi con un cedimento al cono di Abrams di 4" e che l'aria inglobata sia pari all'1,5%, pari a 15 l/ mc.

Consultando le varie tabelle emesse dall'ACI, con lo Standard 613-44, si riscontrano i seguenti valori:

- rapporto a:c = 0,48;
- acqua totale, per un calcestruzzo con slump di 3" = 165 l, da aumentare a 170 l per uno slump di 4";
- percentuale di sabbia = 37%, da ridurre al 35% tenendo conto del rapporto a/c adottato.

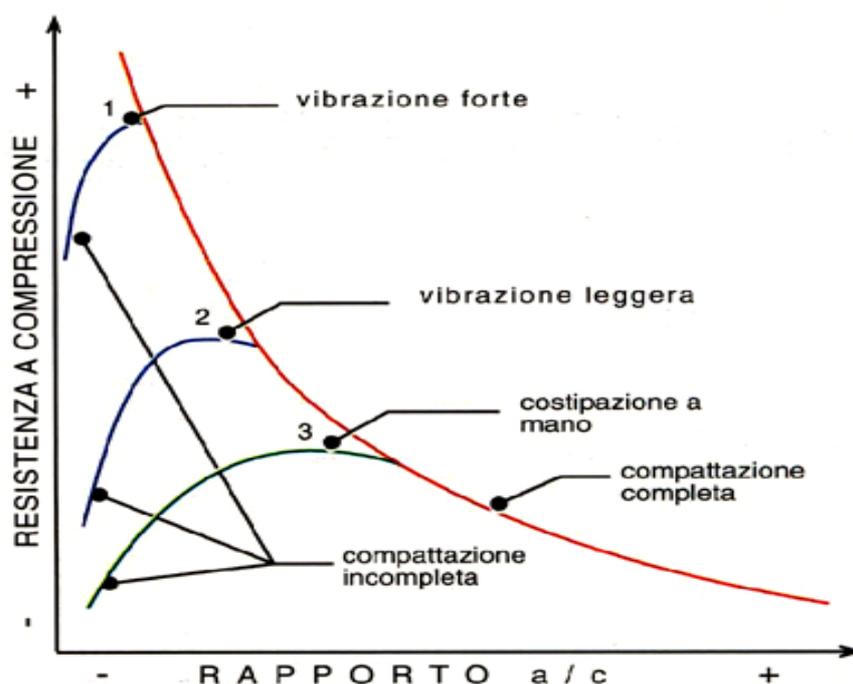


Figura 49 - Effetto della compattazione sulla resistenza secondo Dutron.

Dunque per 1 mc di calcestruzzo si ha:

- ✚ dosaggio di cemento = $(170/0,48)$ kg = 355 kg;
- ✚ volume assoluto della pasta cementizia = $[170 + (355/3,15) + 15]$ l = 297 l;
- ✚ volume assoluto degli aggregati = $(1000 - 297)$ l = 703 l;
- ✚ volume assoluto della sabbia = $(703 \times 0,35)$ l = 246 l;
- ✚ volume assoluto della ghiaia = $(703 - 246)$ l = 457 l;
- ✚ peso della sabbia = $(246 \times 2,65)$ kg = 652 kg;
- ✚ peso della ghiaia = $(457 \times 2,65)$ kg = 1.211 kg;

Avendo calcolato l'umidità superficiale:

- ✚ della sabbia = $(652 \times 0,03)$ kg = 20 kg;
- ✚ della ghiaia = $(1.211 \times 0,01)$ kg = 12 kg;

l'acqua totale dagli aggregati è $(20 + 12)$ kg = 32 kg e, di conseguenza:

- ✚ il peso della sabbia umida = $(652 + 20)$ kg = 672 kg;
- ✚ il peso della ghiaia umida = $(1.211 + 12)$ kg = 1.223 kg;
- ✚ l'acqua aggiunta = $(170 - 32)$ kg = 138 kg (pari, ovviamente, a 138 l).

Da quanto riferito poc'anzi, deriva il seguente proporzionamento numerico ponderale dell'impasto:

cemento: (peso sabbia umida/cemento) : (peso ghiaia umida/cemento), ovvero

$$355 : (672/355) : (1.223/355) = 1:1,9:3,4$$

Questo procedimento non è molto sfruttato in Italia, dal momento che presuppone un elevato numero di prove e una vasta casistica.

Pertanto si ritiene più facilmente applicabile, anche per esperienze dirette dello scrivente, la determinazione della composizione dell'impasto di calcestruzzo, derivata dalle norme tedesche, la DIN 1164 e dal metodo di prova ISO, con particolare riferimento al dosaggio di cemento da adottare.

Metodo tedesco (DIN 1164)

Il metodo tedesco non prende in considerazione, anche in via preliminare, la migliore composizione percentuale della miscela degli aggregati, che viene calcolata secondo la curva di Füller o altri metodi, ma valuta esclusivamente il probabile dosaggio di cemento da adottare, per mc di impasto, in funzione della resistenza effettiva del cemento, su malta plastica, a 28 giorni di stagionatura, della consistenza del calcestruzzo nonché della forma e dimensione massima dell'aggregato. Si consideri, per esempio, di dover realizzare una struttura per la quale, in base ai

calcoli, sia prevista una resistenza media del calcestruzzo, dopo 28 giorni di stagionatura, di 38,0 N/mm².

Si valuti inoltre che il cemento disponibile sia un CEM I 425 che fornisca, realmente, una resistenza a compressione, a 28 giorni, di 48,0 N/mm²; si impieghino inerti alluvionali, di forma tondeggiante, con D_{max} 30 mm; e infine che la struttura in oggetto sia mediamente armata, per cui si dovrà adottare una consistenza dell'impasto, misurata con abbassamento al cono di Abrams, di 150 mm (slump test).

Qui di seguito si riassumono i dati:

- ✚ resistenza a compressione media del calcestruzzo = 38,0 N/mm² su malta plastica;
- ✚ resistenza a compressione effettiva del cemento = 48,0 N/mm²;
- ✚ inerte tondeggiante D_{max} 30 mm;
- ✚ slump 150 mm.

Si procede, come prima operazione, alla determinazione del rapporto tra la resistenza del calcestruzzo e la resistenza effettiva del cemento (Figura 50):

$$R_{cls}/R_{cem} = \text{N/mm}^2 (38,0/48,0) = 0,79$$

(6.7)

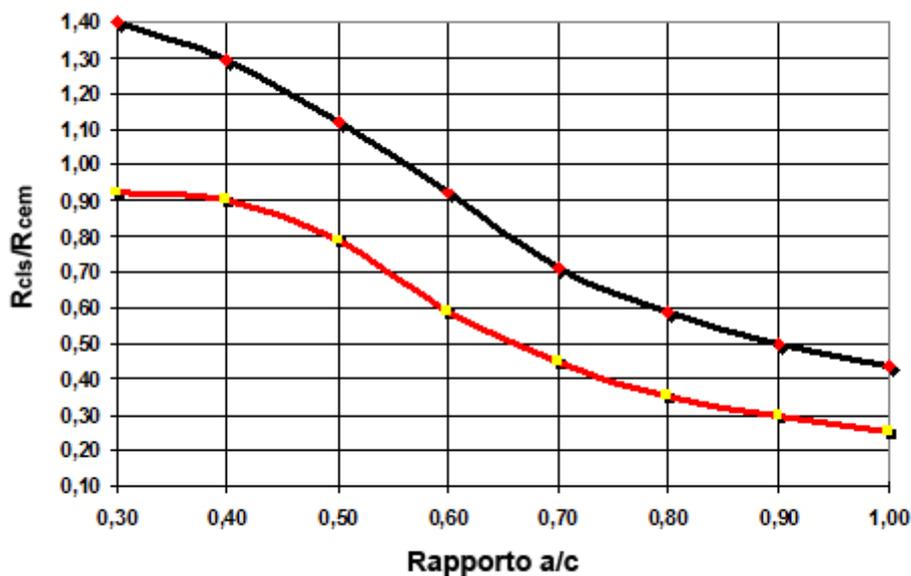


Figura 50 - Rapporto tra la resistenza del calcestruzzo e quella del cemento.

Dal grafico di Figura 50, che riporta in ordinata i valori R_{cls}/R_{cem} ed in ascissa i rapporti a/c, si rileva un rapporto a:c = 0,57.

La Tabella 31 indica, per un aggregato con D_{max} 30 mm, di forma tondeggiante e per un calcestruzzo a consistenza plastica, un fabbisogno d'acqua d'impasto di circa 180 l/mc.

Quindi il dosaggio di cemento è (180/0,57) kg = 315 kg/mc.

Calcolato il dosaggio di cemento e noti i rapporti percentuali tra i vari aggregati e i relativi pesi specifici, la composizione completa dell'impasto viene calcolata secondo quanto già visto precedentemente, sebbene sia comunque indispensabile un aggiustamento dei dati, con il confezionamento di un impasto di prova. Infatti, in alcuni casi, la richiesta di acqua può essere diversa da quella valutata per mezzo della Tabella 31 e quindi, per mantenere costante il rapporto a/c predeterminato, deve essere modificato il dosaggio di cemento e di conseguenza si dovranno ricalcolare le quantità degli altri componenti.

Si prenda in esame, per fare un esempio, il caso precedentemente visto, nel quale è previsto un quantitativo di 180 l d'acqua d'impasto. Il rapporto a/c prefissato, in funzione della resistenza richiesta, è costantemente pari a 0.57. A questo punto si supponga che l'acqua d'impasto realmente impiegata nel test di prova sia di 220 l; per soddisfare il prescritto rapporto a/c, si dovrà aumentare il dosaggio di cemento secondo:

(220/0,57) kg = 385 kg di cemento per mc di miscela.

Un'affermazione di Neville, particolarmente illuminante rispetto ai temi affrontati in questo capitolo sostiene: “un calcestruzzo di qualità congrua ed uno non idoneo, sono entrambi confezionati con cemento + acqua + aggregati + eventuali additivi. L'unica differenza tra i due prodotti e' la corretta scelta dei componenti ed il loro proporzionamento”.

Quindi può accadere, anche frequentemente, che un calcestruzzo correttamente progettato abbia un costo di produzione inferiore e, sempre, un maggiore valore aggiunto, essendo un prodotto che risolve un problema progettuale e assicura alla struttura la prescritta vita utile, evitando in questo modo onerosi interventi di riparazione o consolidamento.

Riferimenti bibliografici

[1] – Abrams, in E. Dosaggio.

CAPITOLO VIII

LAVORAZIONI E CONTROLLI SUL CALCESTRUZZO FRESCO

Le informazioni fornite nei capitoli precedenti concorrono nel fissare le formule per la determinazione della migliore, o meglio della più congrua composizione di un impasto di calcestruzzo; nondimeno è indispensabile mantenere un controllo su questi elementi, per garantire la costanza della produzione ed assicurare una buona omogeneità della struttura finita.

Generalmente, il controllo di un calcestruzzo si effettua determinando i valori delle rotture a compressione di provini cubici o cilindrici dopo 28 giorni di stagionatura; tuttavia si tratta di un controllo tardivo che può portare, qualora i riscontri non siano positivi, ad onerosi interventi di rinforzo oppure, nei casi estremi, alla demolizione della struttura.

Quindi è estremamente importante un controllo assiduo del calcestruzzo in fase di produzione e di messa in opera, controllo che consente di evitare grossolani errori e difetti.

In questo capitolo non si focalizzerà l'attenzione sui controlli granulometrici degli aggregati, che devono comunque essere periodici, utilizzando eventualmente un vaglio intermedio del relativo campo granulometrico. Per questi si consigliano le seguenti luci per le maglie:

- ✚ per sabbia fine da 0,5 mm;
- ✚ per sabbia granita da 3,0 mm;
- ✚ per ghiaietto da 10,0 mm;
- ✚ per ghiaia da 20 mm.

I veri controlli devono riguardare, soprattutto, le fasi di mescolamento, trasporto e messa in opera dell'impasto di calcestruzzo, nonché le principali caratteristiche dell'impasto fresco; per ognuno di essi si riferiscono brevemente le principali informazioni.

Mescolamento dell'impasto di calcestruzzo

Il mescolamento è un'operazione che consente, partendo da materiali granulari, di forma e composizione diverse, di realizzare un impasto omogeneo, grazie al quale ogni prelievo, di volume sufficientemente grande in rapporto alla dimensione massima dei grani, abbia la stessa composizione.

Sul mercato si possono trovare tre tipi di mescolatori, distinti da una diversa azione del complesso rotante e cioè:

- ✚ mescolatori ad asse verticale, caratterizzati dalla presenza di un sistema di pale che sottopongono il calcestruzzo, normalmente in piccolo spessore, ad un movimento turbolento;
- ✚ mescolatori ad asse orizzontale, dove il calcestruzzo è omogeneizzato per mezzo di pale elicoidali. Hanno un'efficacia inferiore ai mescolatori ad asse verticale, ma permettono la produzione di maggiori volumi di calcestruzzo;
- ✚ mescolatori ad asse inclinato, dove la mescolazione avviene per mezzo di pale fissate sulle pareti del tamburo, per le quali sono particolarmente importanti l'altezza, l'inclinazione e la forma. Si dimostrano svantaggiosi con un'inclinazione dell'asse superiore a 30°.

Confrontando i tempi minimi d'impasto con i diversi tipi di mescolatori, si ricava che:

- ✚ mescolatori ad asse verticale: 8 giri;
- ✚ mescolatori ad asse orizzontale: 30 giri;
- ✚ mescolatori ad asse inclinato: 40 giri e sino a 150 giri.

Alcune normative, anche italiane, indicano come ottimali i seguenti tempi:

- ✚ per mescolatrici fisse non inferiori ad 1', calcolato dalla fine del carico di tutti i componenti;
- ✚ per mescolatori su autobetoniera (asse inclinato) almeno 50 giri del tamburo, alla velocità di mescolazione dichiarata dalla casa costruttrice.

Trasporto del calcestruzzo

Il calcestruzzo nel tragitto di trasporto dal luogo del confezionamento al posto della messa in opera è essenziale che conservi la sua omogeneità, che l'impasto tende a perdere per possibili fenomeni di segregabilità.

A questo proposito si ricorda che con questo termine si indica la proprietà per la quale una classe di aggregato grosso si deposita, all'interno del calcestruzzo, secondo la direzione della gravità. Tuttavia si può avere anche un altro tipo di segregazione, dovuta al trasporto. Si tratta della segregazione esterna, che deriva dalla mancanza di coesione tra la malta cementizia e gli aggregati grossi, per cui è importante prevenire questo fenomeno con l'esecuzione di appropriati studi granulometrici.

Messa in opera del calcestruzzo

I sistemi di messa in opera sono strettamente vincolati alla consistenza del calcestruzzo, alla forma dei casseri, alla densità dei ferri di armatura e ai tempi di lavoro, con l'obiettivo finale di garantirne la migliore compattazione e un riempimento ottimale delle forme. Per questo quindi si adottano, diversi metodi di vibrazione dell'impasto, che variano a seconda della consistenza del calcestruzzo: più forti per consistenze asciutte e meno forti per impasti fluidi.

La branca della fisica che fornisce indicazioni circa i fenomeni fisici e meccanici che regolano la lavorabilità di un calcestruzzo è la reologia.

La reologia studia il movimento dei corpi che si collocano tra lo stato liquido e solido e quindi si adatta allo studio del comportamento del calcestruzzo fresco.

Le qualità reologiche sono normalmente misure di reazioni allo slittamento, dalle quali si ricavano le caratteristiche di viscosità e di coesione dell'impasto. Dalle esperienze effettuate secondo le leggi di Casagrande [1] e Coulomb [2] e dalla determinazione degli indici di scorrimento interno, di coesione e di rottura, si desume la seguente enunciazione:

- ✚ la fluidità di un impasto di calcestruzzo aumenta linearmente con la percentuale d'acqua e questa variazione è molto sensibile;
- ✚ per un calcestruzzo progettato passa da 1 a 10 quando il rapporto a:c passa da 0,25 a 0,45.

Controlli sul calcestruzzo allo stato fresco

Questi controlli, previsti anche dalle norme UNI, sono quelli che consentono la valutazione in tempo reale della qualità del calcestruzzo prodotto, in fase di consegna e di messa in opera; essi riguardano la determinazione di:

- ✚ consistenza dell'impasto;
- ✚ peso specifico del calcestruzzo compattato;
- ✚ resa volumetrica e dosaggio del cemento;
- ✚ contenuto d'aria inglobata naturalmente o artificialmente;
- ✚ temperatura dell'impasto;
- ✚ determinazione dei tempi d'inizio e fine presa.

Determinazione della consistenza del calcestruzzo

A questo punto è opportuno chiarire la differenza tra due termini che sono normalmente e impropriamente impiegati per indicare una caratteristica del calcestruzzo allo stato fresco: la lavorabilità e la consistenza.

Per lavorabilità s'intende infatti, come già indicato nel Capitolo I, la maggiore o minore attitudine di un impasto di calcestruzzo allo stato fresco ad essere messo in opera.

La definizione si ricollega, quindi, non solo alla consistenza del calcestruzzo ma anche ad altri fattori, come la natura petrografica e la forma dell'inerte, la disposizione delle armature metalliche, i mezzi manuali o meccanici adottati per il compattamento, dovendo rispondere a determinati requisiti, sia in fase di messa in opera che nella successiva fase d'indurimento.

Si ricorda infatti che la presenza di vuoti od altri difetti intrinseci in una struttura, diminuisce sensibilmente il valore dell'opera e comporta interventi onerosi di ripristino.

Invece per consistenza si deve intendere lo stato di fluidità della pasta di cemento con gli aggregati e quindi, con questo termine, si indicano tutte le possibili condizioni di fluidità di un calcestruzzo. Vi sono diversi metodi per la determinazione della consistenza del calcestruzzo allo stato fresco, di fondamentale importanza agli effetti dell'impasto e delle resistenze meccaniche, in quanto legati al valore del rapporto acqua/cemento e aggregato:cemento.

Lo slump test o metodo del cono di Abrams

Il metodo più diffuso è quello dell'abbassamento al cono di Abrams [3], di facile impiego in cantiere come in laboratorio (Figura 51). Per questo metodo, detto anche "slump test" o più brevemente "slump", si impiega uno stampo di lamiera metallica con spessore di almeno 1,7 mm, foggiato a tronco di cono, avente un'altezza di 305 mm, base maggiore di 200 mm e base minore di 100 mm. Le basi devono essere, naturalmente, parallele e ortogonali all'asse del cono.

Il prelievo del campione di calcestruzzo deve essere, secondo quanto indicato dalla UNI EN 12350-1:2001, rappresentativo della fornitura di provenienza e in un quantitativo di almeno il 20% superiore a quello necessario per il confezionamento di 4 provini cubici, più il cono stesso.

Per l'esecuzione della prova si inumidisce lo stampo, che deve essere posto su una superficie liscia, pulita, rigida e non assorbente. Si riempie il cono con tre strati successivi di calcestruzzo, ognuno pari a circa 1/3 del volume totale. Ogni strato deve essere assestato con 25 colpi di pestello, ricavato da un tondino di acciaio da 16 mm di diametro e della lunghezza di circa 600 mm, con una estremità emisferica; i colpi del pestello devono essere uniformemente distribuiti sulla superficie di ogni strato e con una penetrazione appena maggiore della sua altezza.

Dopo aver livellato la superficie superiore, si rimuove immediatamente lo stampo sollevandolo lentamente con movimento verticale, in un tempo di circa 5". L'intera operazione di riempimento e rimozione deve durare circa 90".



Figura 51 - Il cono di Abrams.

Il valore della consistenza è determinato dalla misura dell'abbassamento del cono di calcestruzzo rispetto all'altezza dello stampo (Figura 52); a tal proposito si ricorda che secondo la UNI EN 206-1, la consistenza del calcestruzzo fresco è suddivisa in cinque classi, riportate in Tabella 33.

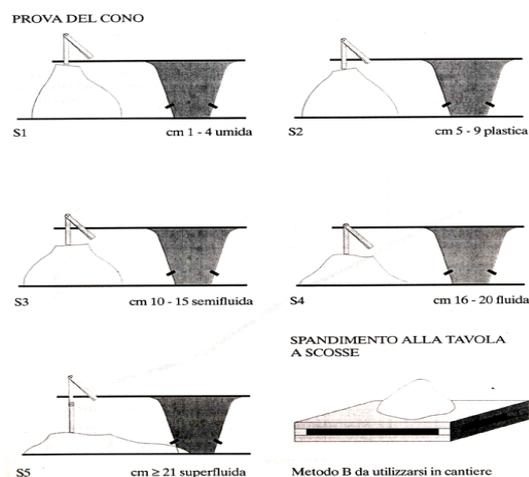


Figura 52 - Slump test.

Classe di consistenza	Slump (cm)	Denominazione
S1	da 1 a 4	Umida
S2	da 5 a 9	Plastica
S3	da 10 a 15	Semifluida
S4	da 16 a 20	Fluida
S5	> 21	Superfluida

Tabella 33 - Categorie di consistenza del calcestruzzo.

Il metodo di Abrams può essere considerato idoneo per calcestruzzi plastici e fluidi, mentre non è applicabile nel caso di calcestruzzi molto asciutti o molto fluidi. Nel primo caso, infatti, non sono apprezzabili le variazioni della misura dell'abbassamento, che possono essere dell'ordine del mm, mentre nel secondo caso l'abbassamento massimo è influenzato dalla granulometria del misto e dal diametro massimo dell'aggregato.

Esistono altri metodi che sfruttano diversi concetti, dei quali si elencano alcune indicazioni nella pagine seguenti.

Metodo del tavolo a scosse (flow table e test)

Il metodo è contemplato dalle norme A.S.T.M.

L'apparecchio, costituito da una forma metallica tronco-conica, avente una base di diametro 25 cm, una di 17 cm e un'altezza di 13 cm, deve posare su una tavola a scosse (Figura 53).

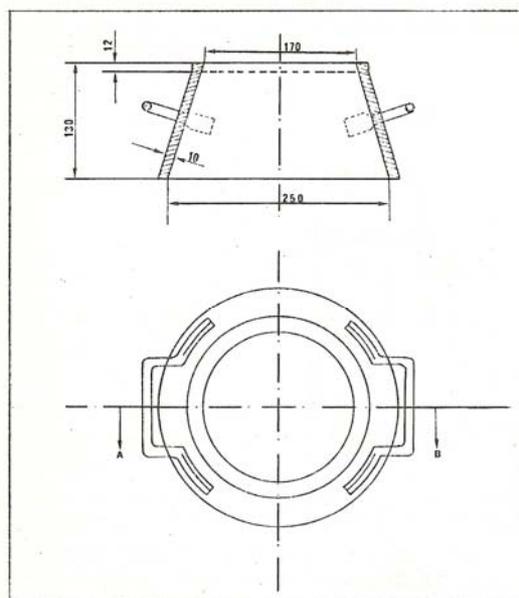


Figura 53 - Forma per la prova della tavola a scosse

La forma viene riempita con due strati di calcestruzzo, assestati con 25 colpi di pestello di ferro. Il calcestruzzo viene livellato e lisciato nella forma, che poi viene sollevata verticalmente; quindi si

applicano alla tavola 15 scosse in 15 secondi, per mezzo di un eccentrico. Infine si misura il diametro D della pizza di calcestruzzo dopo l'espansione, riportando il valore in cm. L'aumento del diametro, riferito a quello iniziale, rapportato a 100, rappresenta lo spandimento percentuale:

$$\% \text{ spandimento} = [(D - 25) / 25] \times 100. \quad (1.8)$$

Il metodo è particolarmente indicato per i calcestruzzi plastici, fluidi e superfluidi e fornisce interessanti elementi per la segregabilità dell'impasto.

Metodo del consistometro VE-BE o metodo svedese

Questo metodo si utilizza, normalmente, per la determinazione della consistenza di impasti rigidi o semi-plastici, come nel caso dei calcestruzzi per dighe, e si basa sul concetto della determinazione del tempo di affioramento della pasta cementizia e quindi del tempo di compattazione dell'impasto. L'apparecchio consiste in un cilindro contenente un cono di Abrams, disposto sopra un apposito banco vibrante e in un disco di plastica, mobile e montato su un supporto, avente un diametro leggermente inferiore al diametro interno del cilindro (Figura 54).

Per effettuare la determinazione della consistenza, si riempie il cono di Abrams secondo il medesimo procedimento adottato per lo slump-test. Dopo averlo sollevato con molta attenzione, si abbassa il disco di plastica sino a farlo coincidere con la parte superiore del cono di calcestruzzo. Una volta che si sia letto il cedimento al cono, espresso in cm, si inizia l'azione di vibrazione, avendo cura di far scattare il tempo a partire dall'azione sull'interruttore, con un contasecondi.

Attraverso il disco di plastica si osserva il momento esatto in cui il calcestruzzo risulterà completamente compattato, cioè quando la boiaccia affiora dai bordi del disco; in questo momento si devono fermare sia il banco vibrante che il contasecondi.

Il grado di consistenza Vébé è dato da:

$$V = T \times (V1/V2) \quad (2.8)$$

dove:

- ✚ T = tempo di compattazione in secondi;
- ✚ V1 = volume iniziale del calcestruzzo pestellato (5,5 l);
- ✚ V2 = volume finale del calcestruzzo compattato.

Secondo le norme BS (British Standard) e anche per l'uso comune presso i laboratori, si può assumere come grado di consistenza il solo tempo in secondi.

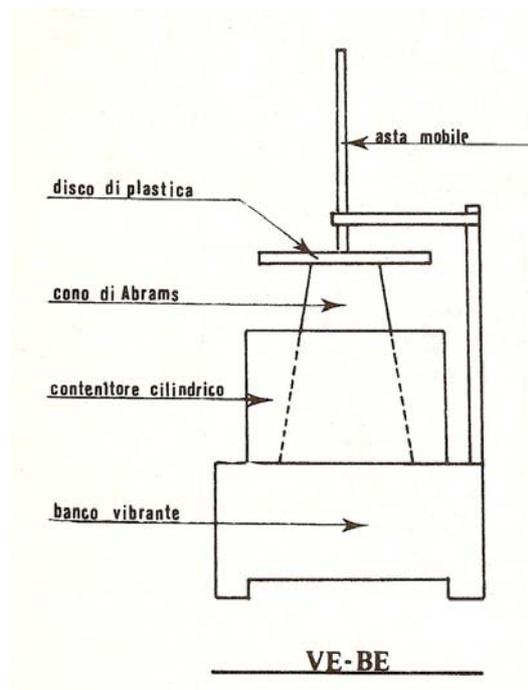


Figura 54 – Le varie parti del consistometro Vébé

Nella Tabella 34 si riportano le relazioni tra i valori della consistenza, espressa in secondi Vébé, in percento dello spandimento (flow test) ed in cedimento al cono di Abrams.

Vébé in sec.	Flow test (%)	Slump test (cm)
16 ÷ 20	1 ÷ 4	0
10 ÷ 15	9 ÷ 12	0,5 ÷ 2
5 ÷ 7	27 ÷ 29	3 ÷ 5
2 ÷ 3	46 ÷ 49	8 ÷ 12
0 ÷ 1	85 ÷ 90	14 ÷ 18
< 0	> 100	> 20

Tabella 34 – Comparazione tra vari metodi di determinazione della consistenza del calcestruzzo.

Sugli altri metodi impiegati si può ricordare che:

- ✚ apparecchio di Glonville per la misura del fattore di compattazione, utilizzato nei paesi anglosassoni;
- ✚ tavola a scosse di Thoulow, basata sul numero di giri di manovella necessari per ridurre un volume di calcestruzzo da 5,5 a 5 l;
- ✚ apparecchio di Walz, costituito da un contenitore prismatico in lamiera e basato sul concetto della compattazione per mezzo di un tavolo vibrante;
- ✚ tavola a scosse DIN consistente in una lastra d'acciaio montata su una tavola di legno e incernierata su una base. Si solleva e si lascia ricadere un lato della tavola, come per il flow test, per 15 volte e si misura lo spandimento del calcestruzzo in cm. È un metodo facilmente impiegabile in cantiere ed è adottato, oltre che in Germania, anche in Svizzera;
- ✚ penetrometro di Kelly, costituito da una semisfera del diametro di 152 mm e pesante 13,6 kg. La consistenza è determinata in funzione della sua penetrazione nel calcestruzzo e misurata su apposite tacche incise sull'asta dello semisfera;
- ✚ sonda DIN, che si basa sul procedimento del penetrometro di Kelly, ma costituita da una sonda cilindrica a testa emisferica.

Determinazione del peso specifico del calcestruzzo fresco.

Per la determinazione del peso specifico del calcestruzzo fresco, detto anche massa volumica, il procedimento impiegato è quello indicato dalla UNI 12350-6:2001, consistente nel misurare la massa di un calcestruzzo, compattato in un recipiente di volume noto. Per il calcolo della massa volumica, si adottano normalmente recipienti metallici cilindrici, dimensionati secondo il diametro massimo dell'aggregato, come indicato nella Tabella 35.

Tipo	Contenitore			D _{max} aggregato (mm)
	Capacità (l)	Ø interno (mm)	h interna (mm)	
A	14	250	280	< 35
B	28	360	280	> 35

Tabella 35 – Dimensioni contenitori per calcolo massa volumica dell'aggregato.

La superficie interna del contenitore deve essere liscia ed a tenuta d'acqua ed il contenitore stesso deve essere indeformabile. Per la taratura del recipiente, si opera determinando il peso dell'acqua necessaria al suo riempimento.

Dato P1 il peso del contenitore pieno d'acqua e P2 il peso del recipiente vuoto, il volume V del contenitore stesso, espresso in litri, è dato da:

$$V = P1 - P2.$$

Quindi si provvede, dopo aver determinato il peso del recipiente vuoto, al suo riempimento con il calcestruzzo in tre stati, se compattato a mano con pestello, o in uno strato unico se vibrato.

Completata questa operazione, si asporta il calcestruzzo in eccesso, in modo di ottenere una superficie il più possibile piana, a livello del bordo del contenitore. La massa volumica, o peso specifico del calcestruzzo fresco P_m , espresso in kg/mc, è data da:

$$P_m = 1000 \times [(P_0 - P_2)/V] \quad (3.8)$$

dove:

- ✚ P_0 è il peso, in kg, del contenitore pieno di calcestruzzo;
- ✚ P_2 è il peso, in kg, del contenitore vuoto;
- ✚ V è il volume, in litri, del contenitore.

Si debba, ad esempio, determinare il peso specifico di un calcestruzzo fresco, con inerte D_{max} 30 mm. In base a quanto indicato precedentemente, si deve impiegare un contenitore da 14 litri, il cui peso è calcolato in 6 kg. Riempito il recipiente con il calcestruzzo in esame, si rileva un peso del contenitore pieno di 39,6 kg.. Quindi si ha che:

- ✚ $P_0 = 39,6$ kg;
- ✚ $P_2 = 6,0$ kg;
- ✚ $V = 14,0$ l.

Il peso specifico del calcestruzzo fresco è dato da:

$$P_m = [(39,6 - 6,0)/14 \times 1.000] \text{ kg} = 2.400 \text{ kg/mc.}$$

Nella pratica di cantiere, si possono utilizzare anche altri recipienti, di volume e peso noti, come ad esempio le cubettiere per i prelievi dei provini (almeno due se da mm 150 x 150 x 150).

Determinazione del dosaggio effettivo e resa volumetrica

Le determinazioni del dosaggio effettivo del cemento e della resa volumetrica, si possono effettuare conoscendo il peso teorico del calcestruzzo calcolato ed il peso specifico del calcestruzzo fresco. Noti:

- ✚ P_t = peso teorico del calcestruzzo (cemento + acqua + aggregati effettivamente dosati);
- ✚ P_m = peso specifico del calcestruzzo fresco;
- ✚ C = dosaggio teorico del cemento;

il dosaggio effettivo equivale a:

$$C \text{ effettivo} = (C \times P_m) / P_t, \quad (4.8)$$

mentre la resa volumetrica è uguale a:

$$V \text{ effettivo} = P_t / P_m. \quad (5.8)$$

Se, ad esempio, per confezionare il calcestruzzo per il quale è stato calcolato un peso specifico di 2.400 kg/mc, si siano dosati effettivamente i seguenti pesi per ciascun componente:

- ✚ cemento 300 kg;
- ✚ acqua 150 kg;
- ✚ aggregato 2.000 kg;
- ✚ peso totale teorico 2.450 kg;

si ricava che:

- ✚ $P_t = 2.450$ kg/mc;
- ✚ $P_m = 2.400$ kg/mc;
- ✚ $C = 300$ kg/mc.

Il dosaggio di cemento effettivo (C effettivo) è:

$$C \text{ effettivo} = \text{kg} (300 \times 2.400) / 2.450 = 293,8 \div 294,0 \text{ kg/mc}$$

mentre la resa volumetrica V effettivo è:

$$V \text{ effettivo} = (2.450 / 2.400) = 1,02 \text{ mc.}$$

Pertanto il dosaggio effettivo è inferiore a quello teorico del 2%, con volume effettivo superiore del 2% rispetto a quello teorico.

Determinazione del contenuto d'aria inglobata

Il contenuto d'aria inglobata viene determinato mediante l'impiego di un "porosimetro"; l'apparecchio è descritto nella norma UNI EN 12350-7, sia per quanto riguarda le sue diverse parti meccaniche, sia per le modalità d'uso.

Il funzionamento del porosimetro si basa sul principio della comprimibilità dell'aria, sottoposta ad una determinata pressione e trasmessa con un mezzo non comprimibile, come l'acqua. È

costituito, essenzialmente, da un recipiente di volume variabile in relazione alla dimensione massima dell'aggregato (Tabella 36) e da un coperchio conico, collegati tra loro per mezzo di flange e serrati a tenuta di pressione per mezzo di guarnizioni di gomma.

Dimensione massima aggregato (mm)	Capacità minima recipiente (l)
Fino a 50	5
Oltre 50 e fino a 70	11
Oltre 70 e fino a 150	70

Tabella 36 – Dimensioni del contenitore del porosimetro, in funzione del D_{max} dell'aggregato.

Il procedimento di determinazione consiste nelle seguenti operazioni:

- ✚ si immette il calcestruzzo nel recipiente di misura corretta, in tre strati uguali, costipando ogni strato con 25 colpi di pestello, così da distribuire uniformemente la massa e senza lasciare cavità;
- ✚ rasata la superficie e pulita la flangia del recipiente di misura, si applica il coperchio e lo si blocca a tenuta;
- ✚ chiuso il rubinetto, posto nella parte inferiore del coperchio e aperto il tappo a vite collocato nella parte superiore, si versa nell'apparecchio acqua, che dovrebbe essere precedentemente bollita, sino a farla raggiungere la linea iniziale di livello L; successivamente si battono alcuni colpi di martello di gomma sulle pareti esterne del coperchio per eliminare eventuali bolle d'aria aderenti;
- ✚ infine si chiude il tappo a vite e, per mezzo di una pompa manuale o altri mezzi, si porta la pressione al valore normale P, che si assume uguale ad 1 kg/cm² (1 Atm) al livello del mare, ma che deve variare in funzione delle diverse quote.

Approssimativamente, per calcolare questa pressione si applica la seguente relazione:

$$P = 1 - 0,0095 h \quad (6.8)$$

dove:

- ✚ P è la pressione normale espressa in chilogrammi forza su centimetro quadrato;
- ✚ h è la quota in ettometri, sul livello del mare, del luogo in cui si usa l'apparecchio.

Si prende nota del livello raggiunto dall'acqua per effetto di tale pressione sulla graduazione posta lateralmente al cilindro di misura, che esprime la percentuale in volume dell'aria inglobata nel calcestruzzo, in unità e decimi percentuali.

Si assume per valida la media delle due letture, purché non differiscano di più di due graduazioni e quindi dello 0,2%.

La determinazione del contenuto d'aria inglobata è particolarmente importante per il getto di calcestruzzi a formazione di sbarramenti di ritenuta, come dighe, ecc. e di strutture per le quali siano di prevalente importanza le caratteristiche di resistenza alle alternanze dei cicli di gelo e disgelo o d'impermeabilità e per le quali sia, quindi, normalmente previsto l'impiego di additivi ad azione fluidificante-aerante o semplicemente aerante.

Nella Tabella 37 si riportano le percentuali d'aria normalmente inglobate nei calcestruzzi, in rapporto alla dimensione massima dell'aggregato, che sono comunque influenzate dalla forma e dal contenuto di finissimo (passante sotto lo staccio di 0,2 mm), nonché dalla consistenza dell'impasto.

Dimensione max aggregato (mm)	10	15	20	30	40	50	70	150
% aria inglobata	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Tabella 37 - Tenore in aria naturalmente inglobata.

Determinazione della temperatura dell'impasto

La temperatura dell'impasto si rileva sul getto di calcestruzzo per mezzo di appositi termometri ad immersione o di termocoppie. La conoscenza di questo valore consente, per getti da realizzarsi in condizioni particolari di temperatura ambiente (alta o bassa), di valutare le condizioni di maturazione dell'impasto di calcestruzzo.

Alcune prescrizioni, relative a getti di massa, forniscono un limite massimo della temperatura del calcestruzzo fresco di 50°C, con l'obiettivo di limitare i fenomeni di fessurazione per successiva contrazione causata dal suo raffreddamento differenziato.

Nel caso di eccessivo aumento della temperatura del calcestruzzo, si prescrive l'intervento con onerosi sistemi di raffreddamento (come ad esempio circolazione d'acqua fredda in tubazioni annegate nella massa) o, meglio, l'impiego di additivi ad effetto ritardante sulla presa del cemento, anche con azione combinata fluidificante.

All'opposto per il confezionamento di strutture prefabbricate a rapido disarmo o per il getto di calcestruzzi con basse temperature ambiente è necessario un aumento della temperatura del calcestruzzo fresco con casseri scaldati o con insufflaggio del vapore direttamente nel mescolatore.

Determinazione dei tempi di inizio e fine presa

Il metodo previsto dalla UNI 7123:1972 si basa sulla progressiva resistenza del calcestruzzo alla penetrazione, misurata in funzione del tempo mediante un idoneo penetrometro. La resistenza alla penetrazione è determinata sulla malta stacciata, partendo da un campione rappresentativo dell'impasto e passante sotto il crivello 5 UNI 2334.

Si definisce tempo d'inizio presa del calcestruzzo, l'intervallo di tempo che intercorre tra l'aggiunta dell'acqua all'impasto e il momento in cui la malta stacciata offre una resistenza alla penetrazione di 3,43 N/mm² oppure di 500 Lbs/sq.in.

Si definisce tempo di fine presa del calcestruzzo, l'intervallo di tempo che intercorre tra l'aggiunta dell'acqua d'impasto ed il momento in cui la malta stacciata offre una resistenza alla penetrazione di 28,0 N/mm² oppure di 3.982 Lbs/sq.in.

È indispensabile, per una corretta definizione della prova, che siano determinati i valori della temperatura ambiente e i provini convenientemente coperti, per evitare un'eccessiva evaporazione dell'acqua della malta. Prima di ogni misurazione, occorre eliminare l'acqua eventualmente separatasi sulla superficie del campione, per mezzo di una pipetta od altri strumenti idonei. Questa operazione ne ricorda una seconda, altrettanto importante anche se normalmente trascurata, la "determinazione dell'acqua d'impasto essudata".

Nel calcestruzzo specifico per la costruzione delle pavimentazioni industriali, lo stesso metodo di prova è utilizzato per determinare i valori di resistenza alla penetrazione all'inizio ed al termine delle operazioni di applicazione di un premiscelato anidro, applicato a spolvero, con relativo trattamento di incorporamento meccanico, la frattazzatura con elicottero.

Determinazione dell'acqua d'impasto essudata (bleeding)

Il procedimento d'esecuzione è quello descritto dalla norma UNI 7122:1989, che si utilizza per aggregato con dimensione massima sino a 40 mm.

Si opera con un contenitore metallico, cilindrico, di circa 9 l, con diametro di 240 ± 5 mm, altezza interna di 200 ± 5 mm e con temperatura ambiente di 20 ± 2°C. Immediatamente dopo aver livellato il calcestruzzo nel contenitore, si registra il tempo e si pesa il contenitore pieno. Si copre con un coperchio adatto, che si toglie esclusivamente per effettuare il prelievo dell'acqua essudata; prelievo deve essere fatto ogni 10' durante i primi 30' e successivamente ad intervalli di 30' sino a fine essudamento.

Il volume dell'acqua essudata può essere calcolato:

- ✚ per unità di superficie del calcestruzzo in esame;
- ✚ come percentuale dell'acqua d'impasto totale.

Nel primo caso il volume d'acqua essudata per unità di superficie è dato da:

$$\text{Volume acqua essudata} = V/S$$

(7.8)

dove:

- ✚ V è il volume dell'acqua essudata, in cc, misurata durante l'intervallo di tempo prescelto;

✚ S è la superficie del campione, in cm².

Nel secondo caso l'acqua essudata, espressa come percentuale dell'acqua d'impasto del campione, è data da:

$$100 (B/C)$$

(8.8)

dove:

✚ B è la quantità dell'acqua essudata, in cc;

✚ C è il peso dell'acqua totale contenuta nel campione, in grammi (peso dell'acqua totale, diviso il volume del calcestruzzo, per il peso del campione in grammi).

Riferimenti bibliografici

[1] – Casagrande, in A. Kleinlogel

[2] – Coulomb, in A. Kleinlogel

[3] – Abrams, in

CAPITOLO IX

LE DEFORMAZIONI DEL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo, che a partire dalla fine della presa del cemento è normalmente considerato come un materiale solido è, invece, in continua modificazione. Come tutti gli altri corpi solidi, esso si deforma sotto carico e tale deformazione può essere di tipo elastico e plastico o, se il carico è mantenuto costante nel tempo, viscoso (fluage o creep); una volta tolto il carico, parte della deformazione è reversibile, mentre l'altra resta acquisita definitivamente. Il calcestruzzo, inoltre, si deforma anche per effetto di altre cause, quali le variazioni della temperatura e dell'umidità dell'ambiente, con ritiri e/o rigonfiamenti.

Il ritiro

Questa deformazione è influenzata essenzialmente dalle caratteristiche della pasta di cemento e dal suo rapporto volumetrico con l'aggregato, nonché dalle condizioni igrometriche dell'ambiente nel quale il calcestruzzo stesso matura. In effetti i fattori che determinano l'entità del ritiro sono:

- ✚ contenuto d'acqua d'impasto del conglomerato cementizio;
- ✚ tipo di stagionatura (tempo di stagionatura, protetta o non protetta, ecc.);
- ✚ condizioni ambientali (vento, umidità, temperatura);
- ✚ tipo e classe del cemento (finezza di macinazione, composizione chimica, cinetica d'idratazione, ecc.);
- ✚ dosaggio di cemento;
- ✚ tipo e contenuto d'aggregato.

Nelle prime ore successive al confezionamento dell'impasto, quando il calcestruzzo ha ancora un comportamento plastico, si verifica un primo ritiro, condizionato peraltro dalle condizioni ambientali, che è sensibile per le paste e le malte cementizie e debole per il calcestruzzo. Generalmente non considerato, tale ritiro è, almeno parzialmente, causa delle fessurazioni che si producono nel tempo (Figure 55 e 56). Dopo le prime 24 ore, il ritiro prosegue più lentamente sino a raggiungere, dopo molti anni, un valore anche superiore a 1.000 μm . Noto che il ritiro è determinato dall'evaporazione dell'acqua, attraverso il sistema capillare della pasta di cemento che lega gli aggregati tra di loro e che questi ultimi non partecipano al fenomeno, anzi vi si oppongono, è evidente che il ritiro stesso è funzione diretta del dosaggio e della finezza di macinazione del legante e che cresce con l'aumento del rapporto acqua:cemento e con la riduzione del rapporto aggregato:cemento (Figura 57). Si osserva che, per un calcestruzzo con rapporto aggregato:cemento = 5:1 e con un rapporto $a/c = 0,70$ il ritiro, dopo 6 mesi di maturazione, è di 0,85 mm/m, mentre con $a/c = 0,50$ è di 0,60 mm/m ed infine con $a/c = 0,40$ scende addirittura a 0,40 mm/m.

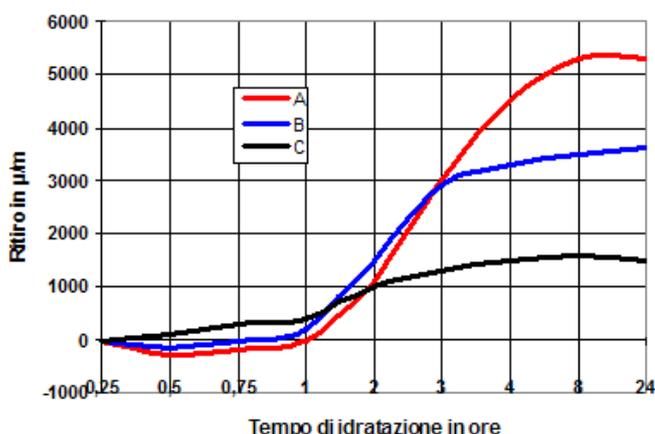


Figura 55 - Ritiro di miscele cementizie nelle prime 24 ore. (A = pasta cementizia, con $a/c = 0,50$; B = malta cementizia 3:1 (rapporto aggregato: cemento); D = calcestruzzo dosato a 350 kg/mc)

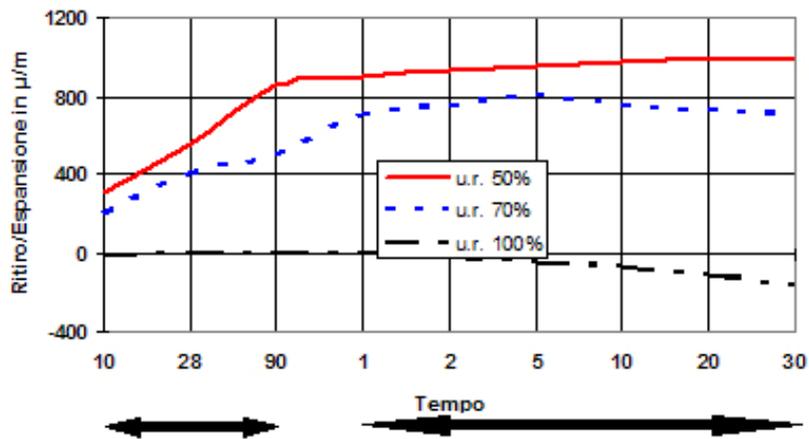


Figura 56 - Influenza dell'umidità relativa sul ritiro di un dato calcestruzzo.

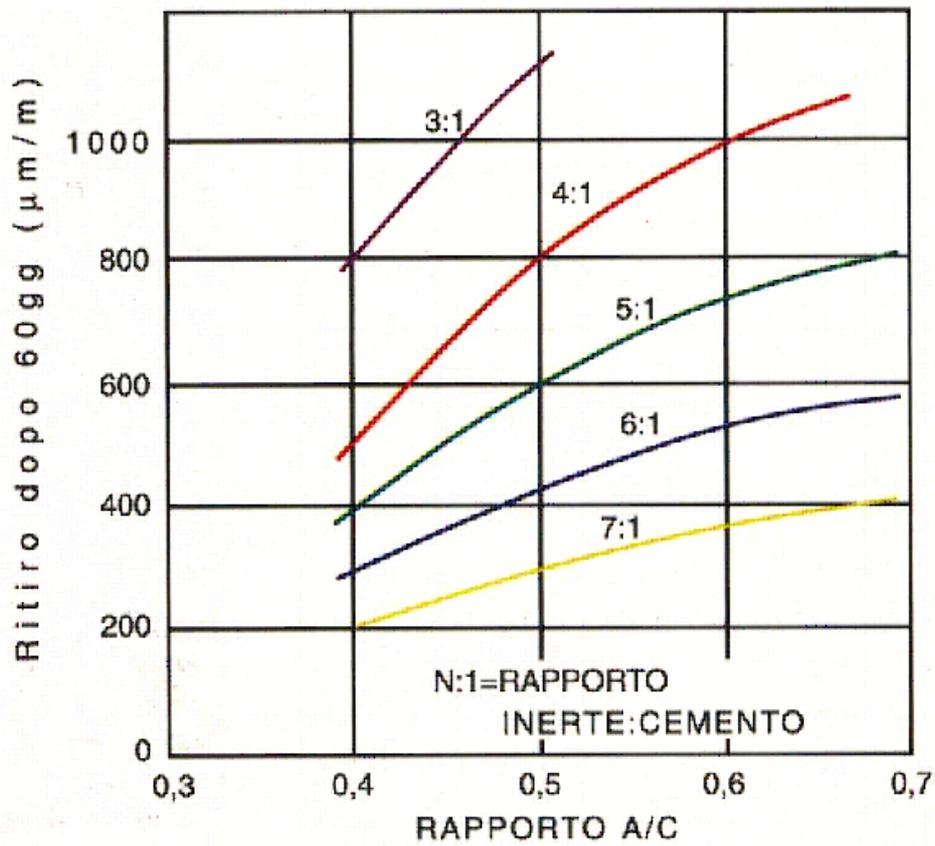


Figura 57 - Influenza del rapporto a/c e del rapporto i/c sul ritiro delle miscele cementizie.

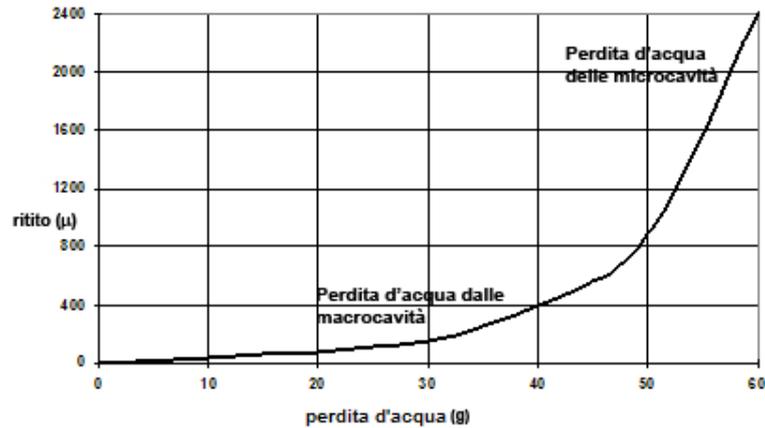


Figura 58 - Ritiro igrometrico di una malta cementizia, rapporto 3:1, stagionata a 20°C per 7 giorni e successivamente essiccata.

Si ricorda che il ritiro aumenta con la perdita d'acqua d'impasto per evaporazione (Figura 58). Per limitare il ritiro, nei limiti del possibile, si raccomanda l'adozione di misure di semplice attuazione:

- ✚ utilizzare aggregati il più possibile compatti e rigidi, con distribuzione granulometrica continua (Fuller, Bolomey); la dimensione massima dell'aggregato sia la maggiore utilizzabile in funzione della sezione della struttura e dell'interspazio tra le barre d'armatura;
- ✚ adottare un mix design con il rapporto a/c il più ridotto possibile e con il massimo rapporto aggregato:cemento;
- ✚ nella posa in opera, evitare le ore calde, asciutte e ventilate; proteggere le superfici della struttura con curing-compound o con opportuna umidificazione a pioggia o teli imbevuti di acqua;
- ✚ aggiungere, in fase di miscelazione, additivi con elevato effetto di riduzione dell'acqua e ritardanti la presa del cemento, al fine di ridurre la velocità di sviluppo del calore di idratazione.

Ribadito il prolungarsi del fenomeno del ritiro nel tempo, è possibile rappresentarne lo sviluppo percentuale, fatto 100 il ritiro a 20 anni (Figura 59).

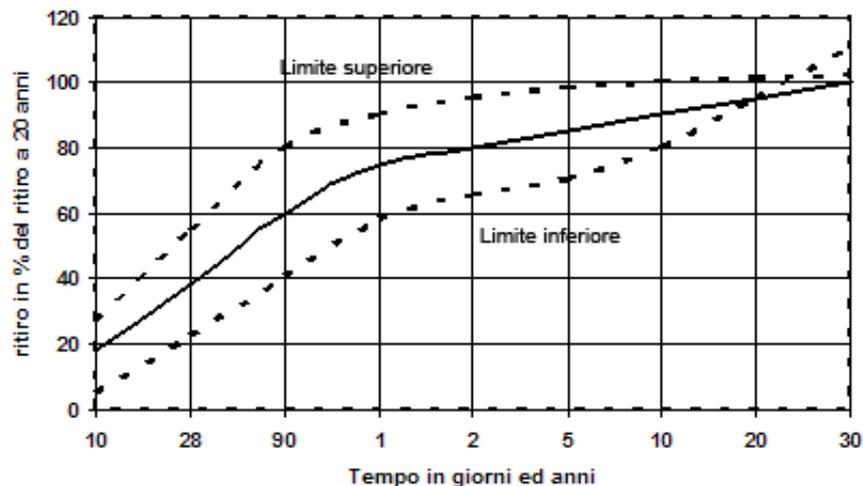


Figura 59 - Sviluppo percentuale del ritiro nel tempo.

Un'influenza più limitata è dovuta al tipo di aggregato impiegato, in particolare al suo modulo elastico, mentre è molto più evidente la relazione con le variazioni del contenuto di aggregato stesso nel calcestruzzo (Figura 60).

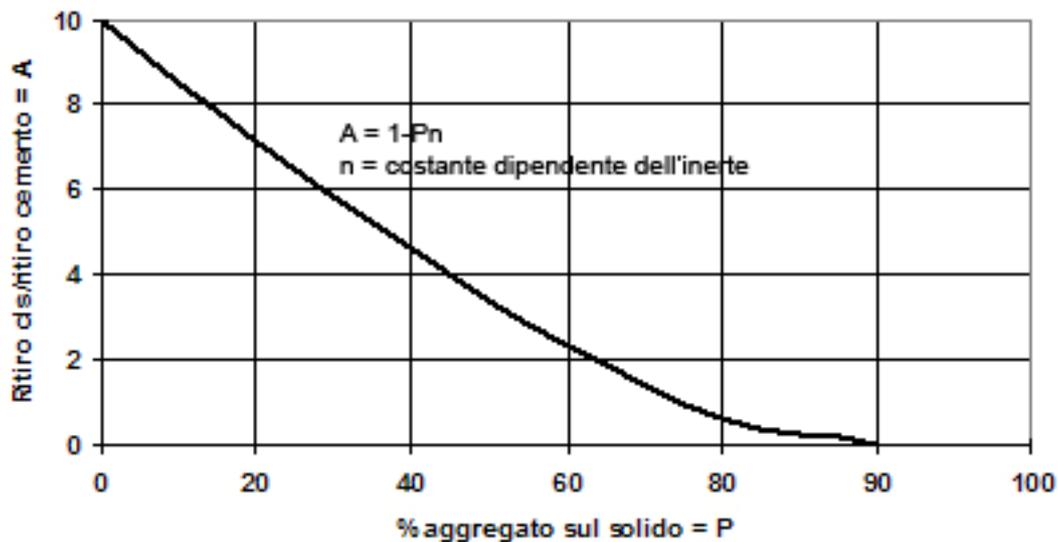


Figura 60 - Influenza del contenuto di aggregato sul ritiro del calcestruzzo.

Deformazione elastica

Una deformazione è detta elastica se è reversibile, cioè se il corpo torna allo stato originario quando viene meno lo stato di sollecitazione imposto che ha determinato la deformazione. Si hanno deformazioni elastiche quando le forze applicate sono di entità inferiore ad un limite, che dipende dal materiale, dalla temperatura, dal tipo di deformazione considerata, ecc. In un calcestruzzo tale deformazione reversibile è funzione delle caratteristiche elastiche del cemento indurito e degli aggregati utilizzati.

Ogni materiale presenta infatti una soglia di sollecitazioni, detta limite di elasticità, al di sopra della quale cessa di esibire un comportamento elastico e manifesta fenomeni anelastici (plasticità, rottura, ecc.). Nel caso dei materiali duttili, il limite elastico è associato alla tensione di snervamento, nel caso di materiali fragili, il limite elastico è associato alla rottura del materiale.

Per le deformazioni elastiche si osserva una relazione di proporzionalità tra sollecitazione e deformazione. Il modello matematico più semplice di rappresentazione del comportamento elastico è quello lineare della legge di Hooke, la cui formulazione fa riferimento ai concetti di tensione σ e deformazione ε ed è fornita nel caso monodimensionale dalla relazione (Figura 61):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.9)$$

dove E è il modulo di elasticità di Young ed è una grandezza caratteristica del materiale esprime il rapporto tra tensione ed allungamento.

L'andamento della curva tensione – deformazione per i materiali compositi che, come il calcestruzzo, hanno una microstruttura fortemente disomogenea, è in generale non lineare e non elastico, se non per valori molto bassi della tensione applicata. La rimozione dello stato di sforzo comporta il permanere di una deformazione residua o plastica ε_1' (Figura 62).

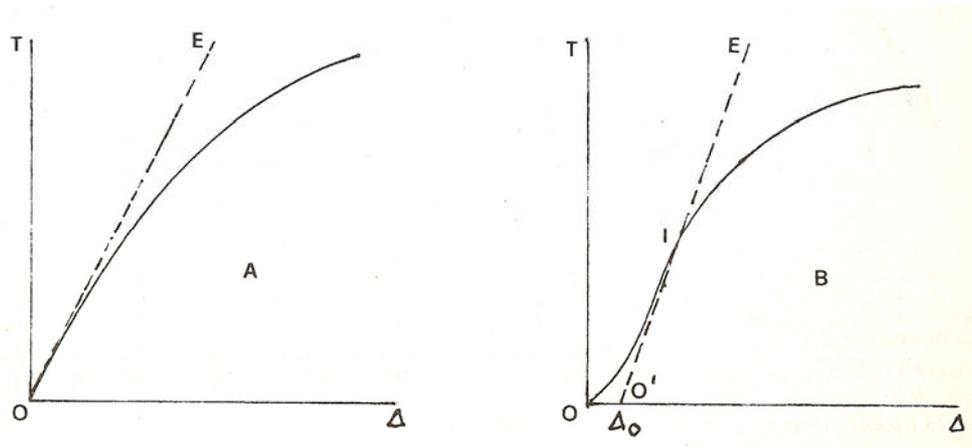


Figura 61 - Curva tensione - deformazione

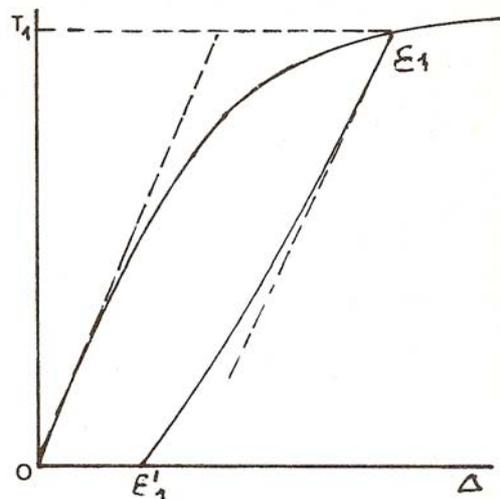


Figura 62 - Deformazione residua ε'_1 dopo l'eliminazione del carico

Indicando con ε_1 la deformazione totale, con ε'_1 la deformazione residua o plastica, la deformazione ε''_1 :

$$\varepsilon''_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon'_1 \quad (2.9)$$

è quella reversibile elastica. È interessante notare che questa deformazione reversibile cresce più velocemente del carico e che, pertanto, il calcestruzzo non è un corpo elastico proporzionale. La deformazione elastica non è quindi un fenomeno semplice e per definirla si considerano tre serie di moduli:

- ✚ modulo elastico totale (E_a) - quoziente del carico applicato e della deformazione elastica corrispondente. È funzione del carico e generalmente diminuisce con esso;
- ✚ modulo elastico istantaneo o statico o iniziale (E_i) - individuato dalla pendenza della retta tangente alla curva sforzo - deformazione nell'origine degli assi è definito dal rapporto σ/ε ;
- ✚ modulo elastico dinamico (E_d) - è il rapporto tra il carico e la deformazione corrispondente, sotto un caricamento ciclico d'ampiezza molto debole. Questo valore è indipendente dal carico ed è, in qualche senso, un elemento variabile nei confronti degli altri moduli. La sua determinazione è semplice e rapida e può essere effettuata ripetutamente, in quanto non si

determina alcuna modifica della struttura interna del calcestruzzo (prova non distruttiva). Si tratta, infatti, di una misura indiretta ottenuta dalla determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni all'interno del provino di calcestruzzo. Tale velocità è correlabile al modulo elastico del materiale attraversato mediante la relazione:

$$E_d = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} V^2 \quad (3.9)$$

dove V = velocità di propagazione delle onde ultrasoniche in m/s; ρ = massa volumica apparente in Kg/m^3 ; ν = modulo di Poisson dinamico del mezzo; la prova viene eseguita appoggiando alle estremità di un provino o tra due punti di un elemento strutturale due trasduttori, uno capace di trasmettere e l'altro di ricevere gli impulsi ultrasonici. Le sonde vanno posizionate con un materiale accoppiante.

Il modulo elastico individuato dal rapporto tra la tensione di compressione di progetto e la corrispondente deformazione, prende il nome di modulo elastico secante e viene calcolato, in accordo con gli Eurocodici, determinando la deformazione del calcestruzzo conseguente ad un valore della tensione applicata pari al 40% della resistenza a compressione del conglomerato.

Il modulo elastico del calcestruzzo è influenzato, in modo sensibile, dalle variazioni della sua composizione, dalla sua compattezza e dalle sue degradazioni fisiche e chimiche ed è strettamente collegato ai valori delle sue resistenze meccaniche. Per esemplificare, si dice che il modulo elastico dinamico di un calcestruzzo di normale qualità, è variabile da 20.000 a 60.000 MPa a seconda dell'età di maturazione e della sua composizione. Si ricorda, inoltre, che questo modulo è più elevato con inerti silicei che con inerti calcarei.

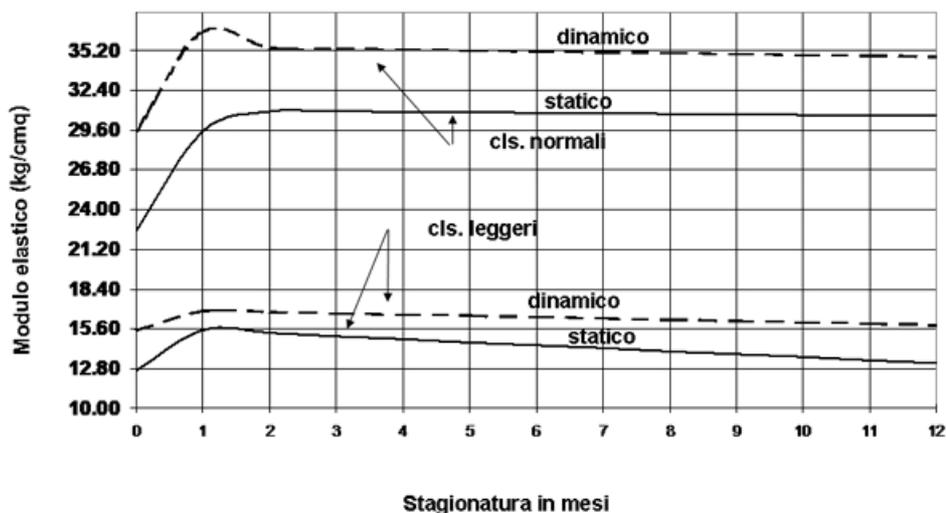


Figura 63 - Moduli elastici statico e dinamico di calcestruzzi normali e leggeri, secondo T.W. Reichard.

Deformazione plastica (fluage o creep)

Per fluage si intende la deformazione plastica irreversibile del calcestruzzo, sottoposto all'azione di un carico costante e permanente. Un provino di calcestruzzo, soggetto ad un carico applicato staticamente e mantenuto costante nel tempo, subisce oltre ad una deformazione elastica istantanea, un'ulteriore deformazione che evolve nel tempo e tende ad un valore asintotico.

Se il fluage può essere considerato un fenomeno positivo perché capace di ridurre lo stato di tensione in una struttura in c.a., lo stesso non si può dire per una in c.a.p., in quanto produce una perdita di precompressione non recuperabile.

In base alle conoscenze tecniche sul calcestruzzo si rileva che:

- ✚ il fluage di un calcestruzzo caricato dopo breve stagionatura, è superiore a quello di un calcestruzzo più stagionato e che l'accrescimento di questo valore è minimo dopo un lungo periodo di caricamento (Tabella 38);

Stagionatura del cls al momento dell'applicazione del carico	Valore del fluage sotto un carico continuo di kg/cm ² 50, dopo:	
	1 anno	3 anni
7 giorni	0,57 mm/m	0,60 mm/m
28 giorni	0,31 mm/m	0,35 mm/m
90 giorni	0,16 mm/m	0,19 mm/m

Tabella 38 - Influenza della durata della maturazione del calcestruzzo al momento del caricamento ed incremento del valore del fluage nel tempo.

- ✚ il fluage di un calcestruzzo aumenta con il valore del carico continuo cui è sottoposto ed inoltre è superiore per calcestruzzi maturati all'aria rispetto ai conglomerati cementizi maturati in acqua;
- ✚ a parità di carico, il fluage di un calcestruzzo è inversamente proporzionale alla sua resistenza a compressione e quindi aumenta con il decrescere di questa caratteristica;
- ✚ il fluage dipende dal volume di pasta cementizia ed è influenzato dalla natura dell'aggregato impiegato per il confezionamento del calcestruzzo; si riduce al diminuire del volume di pasta di cemento e all'aumentare della rigidità dell'aggregato.

Come si sviluppa il fluage nel calcestruzzo e quali sono le relazioni che intercorrono tra le deformazioni plastiche, irreversibili, e quelle elastiche?

Se si rappresenta su di un grafico in funzione del tempo la deformazione residua conseguente all'applicazione su di un provino di un carico di compressione mantenuto per un'ora, si nota che le deformazioni plastiche sono una funzione crescente del tempo di caricamento e che la curva che si ottiene, molto vicina ad una retta, non passa per l'origine. Ciò significa che rimane una deformazione plastica istantanea, non viscosa. Questa prima esperienza mette, dunque, in evidenza che la deformazione plastica cresce in funzione del tempo di caricamento e che continua ad aumentare nel corso dei mesi e degli anni, asintoticamente. Questa deformazione lenta è il fluage (Figura 64).

Esaminiamo il comportamento di un provino di calcestruzzo soggetto ad una compressione costante di modesta entità, in condizioni di temperatura ed umidità anch'esse costanti, misurando periodicamente l'accorciamento Δl del provino misurato tra due basi fisse distanti l_0 e si valuti $\varepsilon = \Delta l / l_0$. La prova inizia al termine della stagionatura standard di 28 giorni.

Se il carico viene rimosso rapidamente dopo un anno di tempo, si osserva che il provino recupera istantaneamente una parte della deformazione acquisita in precedenza (recupero elastico ε_{elast}). Il fatto che tale deformazione allo scarico sia inferiore a quella iniziale è dovuto all'aumento del modulo elastico del calcestruzzo con la resistenza. Cessato il recupero elastico si manifesta un recupero lento della deformazione dovuto allo scorrimento viscoso allo scarico (recupero viscoso ε_{visc}). Se, dopo un anno, si riapplica il carico, con un valore pari a quello iniziale, si presentano di nuovo delle deformazioni iniziali e delle deformazioni viscosi che hanno complessivamente un'entità minore di quella iniziale. Ciò è dovuto all'effetto di invecchiamento del calcestruzzo che comporta un ulteriore aumento del modulo elastico.

Sulla base di questa esperienza si possono avanzare due ipotesi:

1. la deformazione viscosa è proporzionale alla tensione applicata (viscosità lineare);
2. per le deformazioni dovute allo scorrimento viscoso vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

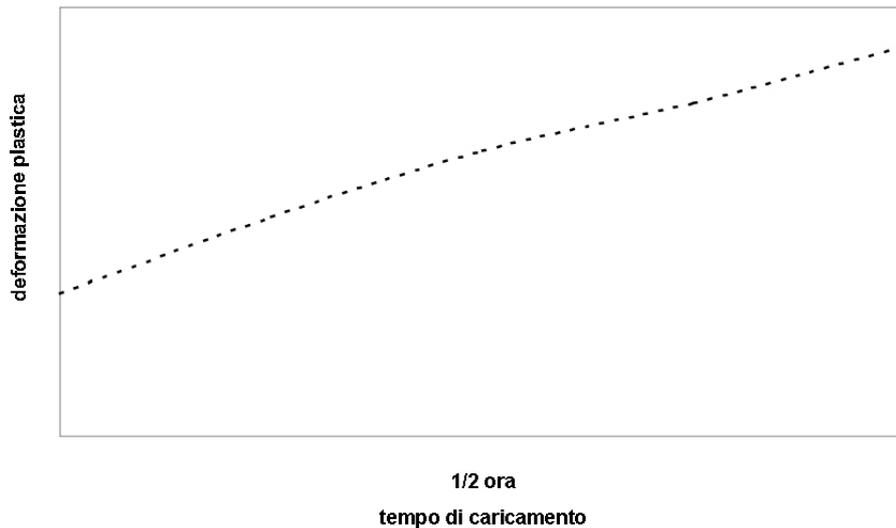


Figura 64 - Deformazione plastica rapida.

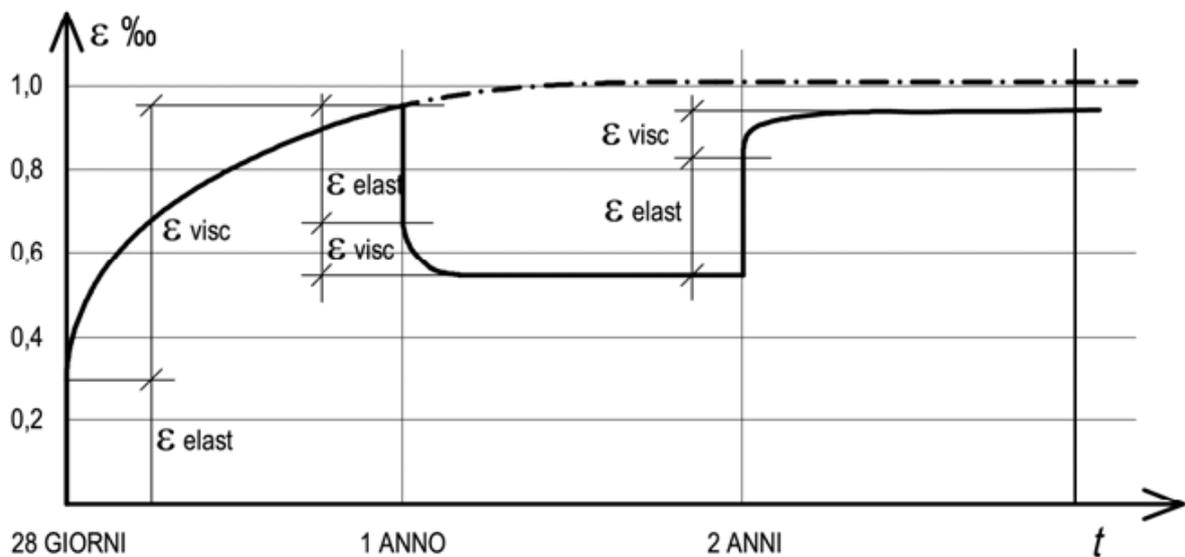


Figura 65 - Fluage del calcestruzzo.

Si ricorda che la deformazione sotto carico costante, il fluage, è in parte reversibile se il provino viene immerso in acqua, come si verifica per il ritiro. Varie esperienze hanno dimostrato che l'età alla quale il conglomerato comincia ad essere caricato, è della massima importanza per le grandezze delle deformazioni plastiche. Tanto più la maturazione è prolungata prima dell'applicazione del carico, tanto più piccole risultano le deformazioni. La qualità del calcestruzzo è inoltre determinante sulla loro entità, in quanto i parametri che concorrono ad elevate resistenze meccaniche, ad alto modulo elastico e basso ritiro, agiscono favorevolmente sulla riduzione del fluage.

CAPITOLO X

PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO INDURITO

Il miglioramento delle principali proprietà del calcestruzzo indurito "permeabilità, durabilità e resistenze meccaniche", sono il prodotto della qualità del "fattore tecnologico", cioè della capacità del Tecnico di progettare, produrre e mettere in opera il conglomerato cementizio, in relazione alla esigenza di raggiungere le caratteristiche finali della struttura da realizzare. L'importanza fondamentale di queste tre proprietà è così reale, che il Legislatore le ha recepite e prescritte nella redazione, a livello europeo e nazionale, della Norma UNI EN 206-1. Nel prosieguo non si tratterà l'aspetto normativo, se non di riflesso, bensì l'informazione tecnologica circa i principali accorgimenti da adottare per il conseguimento di corretti risultati.

Permeabilità all'acqua

Si definisce calcestruzzo impermeabile, o meglio a ridotta permeabilità, quella miscela la cui resistenza alla penetrazione dell'acqua dia come risultato un valore massimo minore di 50 mm, un valore medio minore di 20 mm e il rapporto a/c non superiore a 0,55.

La permeabilità all'acqua di un calcestruzzo dipende essenzialmente:

- ✚ dalla permeabilità della pasta cementizia e quindi dal volume totale e dalla grandezza dei capillari, provocati dall'evaporazione dell'acqua d'impasto in eccesso, dal grado di idratazione del cemento, dal tempo di maturazione protetta e dal bleeding;
- ✚ dai grandi pori, più o meno comunicanti tra di loro, conseguenza di un'inidonea compattazione del conglomerato nella fase di messa in opera, così come dai films di acqua da bleeding sotto gli aggregati piatti e successiva sua evaporazione.

È importante ricordare che l'espressione "calcestruzzo impermeabile" è puramente convenzionale e relazionabile alla funzionalità operativa della struttura; un serbatoio in calcestruzzo può infatti essere considerato impermeabile se la migrazione d'acqua attraverso il conglomerato cementizio non costituisca una perdita rilevabile o, quanto meno, sia inferiore alla quantità evaporata sulla superficie libera.

Per principio si devono considerare i seguenti quattro aspetti:

- ✚ il cemento, in quanto l'esperienza dimostra che, a parità di condizioni, si ottengono caratteristiche di permeabilità differenti con l'impiego di leganti diversi. Questo comportamento differenziato è dovuto, per esempio, alle diverse attitudini al ritiro dei leganti ed alle loro diverse superfici specifiche. È infatti dimostrato che per un cemento, a parità di caratteristiche chimico-mineralogiche del clinker, si ottiene un superiore effetto impermeabilizzante in relazione ad aumento della finezza di macinazione, in quanto aumenta la superficie specifica del prodotto finito e di conseguenza la sua capacità di riempimento dei microvuoti della miscela (effetto filler) e di collante a parità di peso; la stessa proprietà è riscontrabile con l'impiego di molti cementi di miscela, per l'elevata finezza dell'aggiuntivo (pozzolane naturali o artificiali). Un'indicazione interessante per la scelta di un cemento idoneo per la produzione di un calcestruzzo a bassa permeabilità, definitivamente stabilita dall'esperienza, è quella di cementi che permettano di produrre una pasta legante viscosa e malleabile. Di contro, non sono considerabili idonei i cementi che sono caratterizzati da un rapido affioramento d'acqua, conseguenza di una ridotta finezza e di una non idonea granulometria;
- ✚ gli aggregati, in particolare le sabbie, preferibilmente a grana tondeggianti, provenienti da fiumi o da depositi morenici; devono essere utilizzate almeno tre classi granulometriche ben selezionate e la dimensione massima dell'aggregato deve essere la maggiore possibile, in relazione alla sezione della struttura ed alla densità dell'armatura;
- ✚ la composizione dell'impasto o mix design (dosaggio di cemento, granulometria, rapporto a/c, consistenza). La condizione principale da raggiungere è che il calcestruzzo, una volta indurito, debba presentare il minimo di vuoti e di pori capillari, comunicanti tra di loro o che attraversino la massa. Questo risultato è conseguibile con l'ottimizzazione del dosaggio di cemento, tale che tutti gli spazi vuoti residui nella mescolanza degli aggregati siano riempiti con una pasta cementizia contenente il minor quantitativo d'acqua possibile. Altra condizione è la consistenza dell'impasto, che deve essere tale da evitare fenomeni di

segregazione ed essere facilmente trasportabile e compattabile con i mezzi a disposizione del cantiere. In caso contrario si determinerebbe fatalmente la formazione di nocivi nidi di ghiaia, separazione del latitante di cemento, ecc. Fondamentale è l'adozione di tutti gli accorgimenti atti a contenere il fabbisogno d'acqua dell'impasto; come noto, l'acqua utile per l'idratazione del cemento è una frazione molto limitata dell'acqua necessaria per conferire al calcestruzzo la sufficiente fluidità e di conseguenza quella in eccesso, una volta evaporata, determina la formazione del sistema dei canalicoli capillari (Figura 66). Negli impasti relativamente poco umidi questi pori sono di diametro molto piccolo e non comunicanti tra di loro, mentre il loro volume e l'interconnessione aumenta con l'aumentare dell'acqua evaporata e quindi del rapporto a/c. Da quanto sopra, è ormai abituale l'impiego di additivi riduttori d'acqua, fluidificanti ad effetto idrofugo di massa o superfluidificanti, dei quali si è già parlato ampiamente nel Capitolo V;

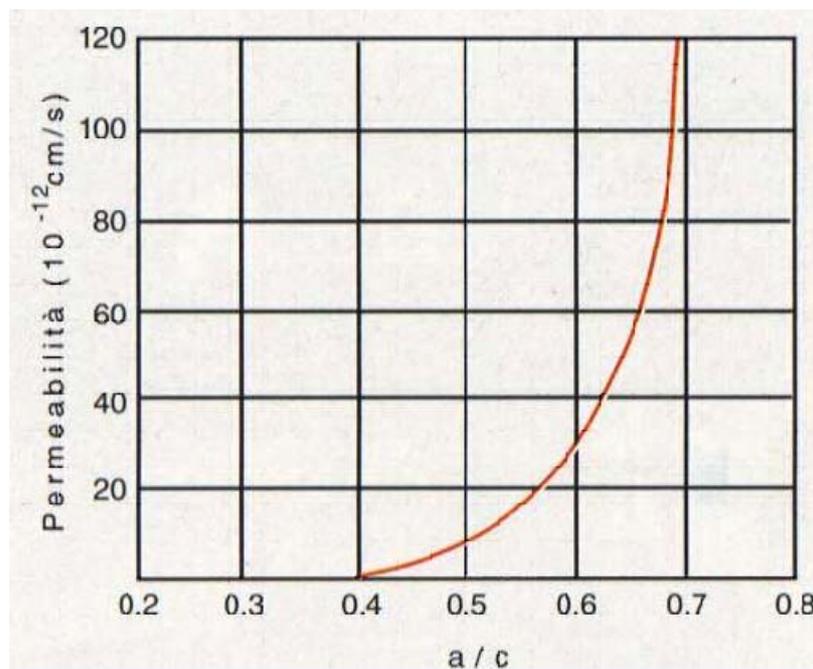


Figura 66 - Permeabilità della pasta di cemento in funzione del rapporto a/c.

- ✚ il tipo e la modalità di messa in opera, in quanto il procedimento più vantaggioso è quello più adeguato alla struttura da realizzare, con una compattazione regolare in funzione del tenore d'acqua del calcestruzzo. La compattazione per mezzo di vibratori meccanici è indispensabile e quelli più indicati sono del tipo ad immersione ad alta frequenza, con durata dell'operazione attentamente controllata, al fine di evitare dannosi fenomeni di segregazione.

Deve essere evitata la formazione di stratificazioni, intervenendo attraverso ricucitura per vibrazione degli strati stessi, quando la presa non è ancora completata, oppure attraverso l'applicazione, tra gli strati già induriti, di adesivi a base cementizia od epossidica o meglio con l'inserimento programmato di idonei nastri di tenuta. Per ultimo, ma non per importanza, si rileva l'indispensabilità della maturazione del calcestruzzo posto in opera, che deve essere di tipo protetto, per un periodo di tempo il più lungo possibile, così da ridurre i rischi di una rapida evaporazione dell'acqua in eccesso e la conseguente formazione di fessurazioni. Molti sono i sistemi utilizzabili, ma quelli più comunemente impiegati sono la nebulizzazione o l'atomizzazione d'acqua sulle superfici o l'applicazione di membrane impermeabili attraverso l'impiego di specifici agenti di curing compound - antievaporanti.

Per la determinazione delle caratteristiche di permeabilità di un calcestruzzo, si ricorre normalmente al confezionamento di una serie di provini cubici con dimensione laterale proporzionale alla dimensione massima dell'aggregato. I provini, correttamente confezionati e rifiniti, sono sottoposti ad una pressione idrostatica, dopo un periodo di stagionatura variabile da 28

a 90 giorni, a seconda del tipo di cemento e della struttura in oggetto. Generalmente, si preparano tre provini cubici per ogni tipo d'impasto, curando di martellarne le facce superiori ed inferiori, che verranno a contatto con l'acqua in pressione; dopo essere stati collocati in un'apparecchiatura tipo AMSLER, sono sottoposti ad una pressione idrostatica, prescelta in base alle specifiche esigenze di ogni lavoro, per un determinato numero di giorni, con intensità crescente.

Per esempio, presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano, si adotta il seguente ciclo:

- atm = 0 (Partenza) - 2,5 (per 5 gg.) - 5,0 (per 5 gg.).

Nel caso di sbarramenti e di dighe, il valore della pressione idrostatica può arrivare sino a 30 atm e può essere mantenuto, per ogni suo valore, anche per un periodo di 10 giorni.

Alla fine di ogni giornata, si rileva il quantitativo d'acqua permeata attraverso il provino, espresso in cc. La quantità d'acqua filtrante in un dato tempo, attraverso un provino di calcestruzzo, dipende dal suo spessore, dalla sua superficie e dalla pressione idrostatica dell'acqua ed è data dalla seguente equazione:

$$(dq/dt) \times (1/A) = K (\Delta h/L) \quad (1.10)$$

dove:

- dq/dt è la velocità del flusso d'acqua, misurata in cc/sec;
- A è la superficie del provino, espressa in cmq;
- Δh è il gradiente idrostatico attraverso i provini, espresso in cm;
- L è lo spessore del provino, in cm;
- K è il coefficiente di permeabilità espresso in cm/sec..

Ricordiamo alcuni valori tipici del coefficiente di permeabilità K :

- calcestruzzo 1×10^{-7} cm/sec;
- marmo $8,24 \times 10^{-12}$ cm/sec;
- granito $5,77 \times 10^{-10}$ cm/sec;
- arenaria $1,23 \times 10^{-8}$ cm/sec.

A titolo informativo, si ricorda che per le prove di permeabilità su calcestruzzi per dighe, si possono impiegare provini cilindrici del diametro di 30 cm e dell'altezza di 34 cm, nei quali si realizza una perforazione assiale di $4,5 \div 4,8$ cm di diametro, adottando un'apparecchiatura costituita da un piatto orizzontale, forato al centro, sul quale sono fissati 8 tiranti, da un secondo piatto e una campana di ferro sovrapposta e fissata per mezzo di bulloni al primo piatto, con interposta una guarnizione ed infine da una piccola pompa a stantuffo verticale.

Vengono posizionati, tra piatti e testate del provino preventivamente spianate, dischi di gomma e vernici bituminose per impedire ogni passaggio di liquido. L'acqua in pressione, a contatto con la superficie cilindrica esterna del provino, permea attraverso un piano radiale per affluire nel foro assiale, per fuoriuscire quindi dal foro centrale del piatto inferiore, dal quale viene raccolta e misurata. La prova di permeabilità viene così condotta:

- il primo giorno la pressione idrostatica della campana viene mantenuta per un'ora a 5 atm e per un'ora a 15 atm. In questo primo giorno, considerato di imbibizione del provino, non si effettua alcuna misurazione delle eventuali infiltrazioni;
- il giorno successivo viene mantenuta una pressione costante di 15 atm, curando di misurare l'acqua permeata nella prima, nella seconda e nelle ultime cinque ore; il valore del coefficiente di permeabilità del calcestruzzo viene definito dalla teoria della filtrazione, considerando il provino come mezzo permeabile, cilindrico, soggetto ad una pressione uniforme sulla superficie esterna ed a pressione nulla sulla superficie interna.

Ne risulta pertanto la seguente formula:

$$K = (1/10^3) \times [(\log.D/d)/2\pi] \times q/hp \quad (2.10)$$

dove:

- K è il coefficiente di permeabilità, espresso in cm/ora;
- D/d è il rapporto tra il diametro esterno ed interno del provino, in cm;
- q è la portata d'acqua filtrante, in cc/ora;
- h è l'altezza del provino, in cm;
- p è la pressione, in kg/cmq.

Si valuta che il primo metodo sia più realistico e più assimilabile alle effettive condizioni operative delle opere di calcestruzzo, più flessibile e quindi utilizzabile per strutture diverse, sia per opere civili e industriali che idrauliche.

Agli effetti di una più esatta analisi della correlazione permeabilità:durabilità di un calcestruzzo, si consideri l'indicazione della Norma DIN 1048, parte 1a e successiva prescrizione DIN 1045, che fornisce ulteriori parametri, quali:

- ✚ penetrazione massima dell'acqua, senza attacchi chimici ≤ 50 mm;
- ✚ penetrazione massima dell'acqua, con attacchi chimici ≤ 30 mm.

La prova DIN viene effettuata su piastre da 20 x 20 x 12 cm, dapprima ad una pressione di 1 atm per 48 ore e successivamente per 24 ore a 3 atm e a 7 atm.

Durabilità

È possibile definire la durabilità (vedi norma UNI 8981) come la capacità delle strutture in calcestruzzo e in c.a. di limitare, nel tempo, la riduzione delle proprie caratteristiche funzionali, entro limiti accettabili in relazione alla prevedibile durata di vita dell'opera stessa.

Questa proprietà dipende essenzialmente da fattori ambientali, ma anche dalle caratteristiche del conglomerato cementizio, quindi da cause esterne e/o da cause intrinseche alla miscela. Statisticamente si rileva che ben il 45% delle cause del degrado dipende dalla qualità del calcestruzzo, il 25% da problemi di messa in opera, solo il 15% da difetti strutturali e il rimanente 15% da cause accidentali, quali incendi, terremoti, ecc. Si può quindi affermare, che il 70% delle cause di degrado sono riconducibili ad una non idonea qualità del calcestruzzo ed alla sua messa in opera, mentre solo il 15% è apparentemente imputabile alla responsabilità del Progettista (Tabella 39).

CAUSE	DESCRIZIONE	%
Qualità del calcestruzzo	Calcestruzzo di cattiva qualità. Materiali non idonei. Scadente qualità del copriferro.	45
Messa in opera	Calcestruzzo eccessivamente rigido. Scarso controllo della messa in opera. Ignoranza delle tecniche esecutive.	25
Strutturali	Calcolo strutturale inadeguato. Inadeguato spessore del copriferro. Struttura non idonea.	15
Accidenti	Sovraccarichi. Fondazioni inadeguate. Incendi. Terremoti.	15

Tabella 39 - Incidenza delle cause di degrado del calcestruzzo.

In realtà questa incidenza è sensibilmente più elevata, in quanto si può far rientrare tra le cause di degrado da errata progettazione, anche la carenza di indicazioni in termini di prestazione e durabilità dell'opera, in relazione all'ambiente di esercizio.

Il tema durabilità è talmente importante, che le nuove Norme Tecniche impongono al Progettista di dare precise prescrizioni in merito al tempo di vita utile della struttura in calcestruzzo e in c.a., supportato dalle indicazioni della UNI EN 206-1 (con integrazione della norma nazionale UNI 11104 "Istruzioni complementari per l'applicazione della UNI EN 206-1").

Questa norma, si fa carico di questa anomalia, fornendo tutta una serie di parametri di classificazione dell'ambiente in relazione al grado di aggressione nei confronti della struttura da

progettare, confermando che per produrre un calcestruzzo durevole (o durabile), che protegga l'acciaio delle armature dalla corrosione e resista in modo soddisfacente alle condizioni ambientali e di esercizio a cui viene esposto nella durata di vita prevista, si devono prendere in considerazione i seguenti fattori:

- ✚ la scelta di costituenti appropriati;
- ✚ la scelta di una composizione del calcestruzzo tale che soddisfi tutte le sue esigenze allo stato fresco ed indurito, che possa essere gettato e compattato senza difficoltà, che fornisca uno strato copriferro sufficientemente impermeabile e che sopporti sia le azioni interne che quelle esterne, dovute a condizioni atmosferiche, gas, liquidi e terreni;
- ✚ la maturazione del calcestruzzo sia tale che si raggiungano le proprietà richieste, specialmente nella zona corticale;

In definitiva viene fornita al Progettista una precisa linea operativa da seguire:

- ✚ definire la classe di esposizione dell'ambiente nel quale deve vivere l'opera. Sono indicate sei classi di esposizione, suddivise in diciotto sottoclassi, con le quali vengono identificati i diversi tipi di aggressione possibili (X0, XA, XC, XD, XF, XS) e il livello di aggressività (1, 2, 3, 4); per ogni classe di esposizione, sono fornite indicazioni circa le caratteristiche dell'ambiente (Tabella 40);
- ✚ in relazione alla classe di esposizione, prescrivere le minime caratteristiche del calcestruzzo, quali rapporto a/c massimo, classe di resistenza minima, dosaggio di cemento minimo, eventuale contenuto di aria inglobata, eventuali note su aggregati e cemento, necessarie per garantirne la durabilità nel tempo di vita utile previsto.

Attraverso questi strumenti il Prescrittore è, quindi, in grado di fornire gli input/guida, utili al Tecnologo per la messa a punto del mix design della miscela cementizia.

X0 – Ambiente senza rischio di aggressione.	XD – Ambiente nel quale la corrosione delle armature è effetto dei cloruri da sali disgelanti.
XA – Ambiente nel quale l'attacco al calcestruzzo è dovuto a sostanze chimiche di vario tipo.	XF – Ambiente nel quale l'attacco del calcestruzzo è effetto dei cicli di gelo e disgelo.
XC – Ambiente nel quale si ha carbonatazione e corrosione delle armature.	XS – Ambiente nel quale la corrosione delle armature è effetto dei cloruri che derivano dall'acqua di mare.

Tabella 40 – Le classi di esposizione ambientale secondo le UNI EN 206-1 ed UNI 11104.

Molto corretta, anche se non sempre corrispondente alla realtà, è l'identificazione della durabilità del calcestruzzo, per ogni classe di esposizione, attraverso una specifica classe di resistenza caratteristica a compressione, che discende dal concetto che ad un aumento della resistenza corrisponde, generalmente, maggiore compattezza e ridotta permeabilità del conglomerato cementizio indurito; per quanto sopra, è indispensabile prescrivere le resistenze minime per la durabilità, anche se queste risultassero superiori a quelle richieste per la statica del calcolo strutturale. In linea generale, si è già visto che una costruzione in calcestruzzo può essere circondata dall'atmosfera, dall'acqua o dal terreno, che tutti questi tre ambienti possono contenere gli stessi agenti aggressivi pur caratterizzandosi per una diversa efficacia di azione; la soluzione del problema è, quindi, una corretta diagnosi delle condizioni ambientali ed una ovviamente mirata progettazione degli interventi da realizzare. In riferimento al calcestruzzo, normalmente il suo proporzionamento o mix design, consiste nel determinare in quali percentuali dosare i suoi diversi costituenti, tenendo conto delle prescrizioni progettuali e funzionali della struttura da realizzare e delle condizioni operative esistenti nel cantiere. In particolare il mix design deve essere impostato con prelazione sulla durabilità e deve ulteriormente considerare:

- ✚ la natura dell'agente aggressivo;
- ✚ l'ambiente, quindi l'atmosfera, l'acqua, il terreno;
- ✚ la condizione di esposizione.

Quindi, come si è già analizzato nel capitolo VIII, il mix design del calcestruzzo si può considerare come un insieme di flussi d'informazione finalizzati alla definizione del rapporto a/c massimo e del dosaggio di cemento minimo, da adottare per ottimizzare il rapporto aggregato:cemento, come confronto e compromesso tra l'esigenza del calcolo strutturale dell'elemento e quella della sua durata utile nel tempo di esercizio prefissato.

Seguendo le esperienze tecnologiche, supportate dalle indicazioni normative, in relazione agli agenti aggressivi individuati, all'ambiente nel quale si colloca la struttura e nel quale sono presenti gli stessi aggressivi e al suo grado di esposizione, si definisce il tipo di cemento da utilizzare, chimicamente resistente o modificato in cantiere con specifici reattivi ad attività pozzolanica. Qualora sia previsto il degrado per alternanza dei cicli di gelo - disgelo (strutture in montagna, zone con rilevanti escursioni termiche tra il giorno e la notte o stagionali) è necessario definire anche il contenuto d'aria inglobata per assicurarne la protezione e pertanto l'impiego di additivi ad azione aerante.

Cause di degrado del calcestruzzo

Si ricorda che è possibile classificare le cause di degrado del calcestruzzo in due grandi famiglie, quelle intrinseche al materiale e quelle esterne dovute all'ambiente (Tabella 41).

CAUSE INTRINSECHE AL MATERIALE	CAUSE ESTERNE DOVUTE ALL'AMBIENTE
<p>- Composizione del calcestruzzo: rapporto a/c e rapporto inerte/cemento (Figura 89 e 90); qualità del cemento, degli inerti e degli additivi; errato proporzionamento dei componenti.</p> <p>- Lavorabilità del calcestruzzo</p> <p>- Stagionatura del calcestruzzo</p>	<p>- Cause chimiche: anidride carbonica ed anidride solforosa; solfati e cloruri.</p> <p>- Cause fisiche: gelo e disgelo, essiccazione, alte temperature.</p> <p>- Cause meccaniche: abrasione, erosione, cavitazione.</p>

Tabella 41 - Cause di aggressione del calcestruzzo.

Le cause intrinseche possono essere riassunte in:

- ✚ errata scelta dei materiali, quali cementi non chimicamente idonei, aggregati reattivi, acqua d'impasto contenente impurità nocive, additivi non specifici;
- ✚ errato proporzionamento della miscela cementizia, per esempio rapporto a/c troppo elevato e rapporto aggregato:cemento troppo basso (Fig. 67), granulometria inadeguata;
- ✚ lavorabilità del calcestruzzo, in particolare la sua consistenza, non idonea per i mezzi di messa in opera e compattazione utilizzati in cantiere;
- ✚ stagionatura del calcestruzzo inadeguata in termini di tempo di protezione umida.

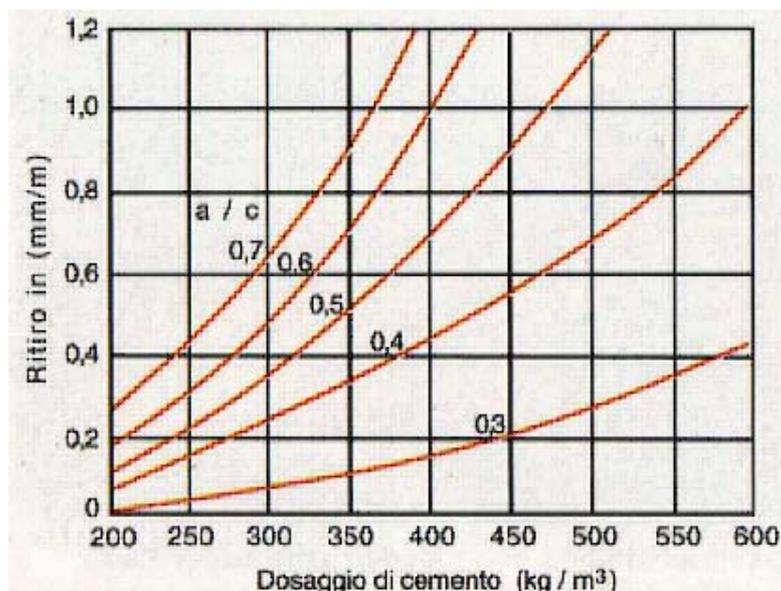


Figura 67 - Rapporto tra contenuto in cemento, al variare del rapporto a/c e il ritiro del calcestruzzo.

Tutta l'attenzione deve essere posta nell'adottare gli accorgimenti indispensabili per migliorare la durabilità, in particolare:

- ✚ limitazione del rapporto a/c;
- ✚ massima durata del tempo di maturazione protetta e di conseguenza riduzione della sua permeabilità all'acqua e ai gas.

È utile rammentare che quanto minore è il rapporto a/c, tanto più ridotta è la distanza tra i granuli di legante e quindi più compatta e meno porosa la struttura microcristallina della pasta di cemento determinata dall'intreccio dei cristalli fibrosi, formati a seguito del processo di idratazione del cemento. Con il progredire dell'idratazione sono, inoltre, maggiori il numero e la grossezza dei cristalli di idrosilicati, che riducono ulteriormente i pori capillari.

Si può dimostrare quanto sopra attraverso l'equazione di Powers :

$$V_p = (100 a/c) - (36,15 g) \quad (3.10)$$

dove:

V_p è il volume dei vuoti capillari, espresso in litri per 100 kg di cemento e g è il suo grado di idratazione.

Se si ipotizza un calcestruzzo dosato in ragione di 350 kg di cemento per mc, con rapporto a/c = 0,60, è possibile calcolare il volume dei capillari della pasta legante, in funzione del grado di maturazione (g):

- $g = 0,50$ (circa 7 gg. di maturazione umida), $V_p = (100 \times 0,60) - (36,15 \times 0,50) = 41,9\%$;
- $g = 0,70$ (circa 28 gg. di stagionatura umida), $V_p = (100 \times 0,60) - (36,15 \times 0,70) = 34,7\%$.

Questo, cioè il passare da un tempo di maturazione umida di 7 a 28 gg, comporta una riduzione dei pori del 17%. D'altra parte, ancora più importante e più semplicemente ottenibile, è la riduzione dovuta al contenimento del rapporto a/c. Se, infatti, il rapporto a/c è pari a 0,45, per $g = 0,50$, la porosità è: $V_p = (100 \times 0,45) - (36,15 \times 0,50) = 26,9\%$.

La diminuzione percentuale, rispetto alla porosità della pasta cementizia del cls con a/c = 0,60, con stesso grado di maturazione, è pari a ben il 36%.

È quindi evidente che la riduzione del rapporto a/c influenza in maniera più determinante la diminuzione della capillarità, rispetto al prolungamento della maturazione protetta, ma che l'adozione di entrambe le precauzioni porta al migliore dei risultati.

Le cause esterne, dovute all'ambiente, sono quelle derivanti dall'azione di alcuni agenti aggressivi naturali, tralasciando quelli industriali che sono sfera di competenza della protezione chimico-resistente.

Relativamente all'anidride carbonica, la sua azione sul conglomerato cementizio è generalmente modesta, mentre risulta determinante nei confronti della corrosione delle armature metalliche, in particolare passando da un contenuto nell'aria dello 0,023% ÷ 0,050% allo 0,200% tipico delle aree cittadino-industriali. Il fenomeno chimico, che si verifica anche per anni sulle superfici del calcestruzzo a contatto con l'atmosfera, consiste nella combinazione dell'idrato di calcio Ca(OH)_2 , proveniente dalla pasta di cemento idratata, con l'anidride carbonica CO_2 con conseguente formazione di calcare, CaCO_3 e di acqua.

Il calcare, insolubile in acqua, si deposita nei pori del calcestruzzo, mentre l'acqua liberata scioglie ulteriore idrato di calcio e la reazione dell'acido carbonico dell'aria continua. Questa reazione, conosciuta con il nome di CARBONATAZIONE, provoca la diminuzione del pH della soluzione liquida permeante i pori, che scende da 13 ad 8,5 circa per un conglomerato cementizio completamente carbonatato. In queste condizioni il ferro di armatura non è più passivato e quindi viene ossidato e corrosivo dall'ossigeno dell'aria.

L'umidità dell'aria ha molta influenza sul processo, perchè la reazione non può avere luogo senz'acqua, non potendosi dissolvere l'idrato di calcio; d'altra parte i pori saturi d'acqua impediscono egualmente la penetrazione della CO_2 dell'aria. Le condizioni di maggior rischio si hanno, pertanto, nelle condizioni di umidità media, cioè con un'umidità relativa del 50 ÷ 70%, tra le più comuni nelle nostre aree geografiche e il fenomeno descritto è, ovviamente, accentuato e velocizzato in presenza di paste cementizie molto porose.

Le raccomandazioni d'intervento più significative sono:

- ✚ impiego di un cemento di miscela (meno clinker = meno formazione di idrossido di calcio);
- ✚ adozione di un basso rapporto a/c;
- ✚ assicurazione di un sufficiente tenore di cemento;
- ✚ corretta classe di consistenza;
- ✚ formazione di uno strato di calcestruzzo copriferro sufficientemente spesso e compatto.

Molto simile è l'azione aggressiva delle acque contenenti anidride carbonica, che può essere così schematizzata:

- ✚ anidride carbonica legata, non nociva;
- ✚ anidride carbonica libera, che è la sola nociva in quanto solubilizza l'idrato di calcio, che può costituire sino al 25% in peso della pasta di un cemento CEM I.

La velocità e l'entità dell'attacco dipendono, anche in questo caso, dalla permeabilità del calcestruzzo e dalla natura del cemento, per cui valgono gli stessi accorgimenti adottati per ridurre i rischi della carbonatazione.

I solfati, sono normalmente presenti in acque che attraversano suoli argillosi o selenici. L'attacco solfatico si manifesta attraverso la reazione tra il solfato stesso, principalmente di calcio, e l'alluminato di calcio del cemento, come C_3A , con formazione di ettringite o sale di Candlot. Questo composto è costituito da cristallizzazioni, sotto forma di cespugli, che esercitano un'elevata azione espansiva, con tensioni superiori alla modesta resistenza a trazione del calcestruzzo e quindi disgregatrici, in particolare modo nei confronti dello strato corticale. Qualora la reazione avvenga a temperature inferiori a 10°C ed in presenza di anidride carbonica, si ha la formazione di thaumasite, caratterizzata da effetti ancora più nefasti di quelli causati dall'ettringite stessa.

Allo scopo di produrre conglomerati cementizi duresi nei confronti dell'attacco dei sali solfatici, è quindi necessario adottare un cemento solfato-resistente, con un basso o bassissimo contenuto di C_3A , ed un basso rapporto a/c, che deve comunque essere eguale od inferiore a 0,45, nel caso di impiego di cementi CEM I e CEM II; modificare il cemento normale eventualmente utilizzato, con reattivi pozzolanici abbinati ad un superfluidificante; l'azione di questi prodotti determina essenzialmente due benefiche azioni migliorative:

- ✚ azione pozzolanica da parte della silice amorfa che, reagendo con la calce idrosolubile, sottrae un composto capace di formare gesso in presenza di solfati; peraltro se l'ettringite si forma in assenza di calce, è in grado di cristallizzare non producendo fenomeni espansivi;
- ✚ riduzione della permeabilità della pasta di cemento, dovuta alla più omogenea tessitura dei cristalli di idrosilicati insolubili e conseguente importante riduzione della sua porosità, sia capillare che microcapillare.

Infine, confezionare calcestruzzi con classe di consistenza non inferiore ad S4, allo scopo di garantirne un'ottimale compattazione. È ovvio che tutti questi fattori DEVONO essere controllati e verificati attraverso il controllo di produzione dell'Appaltatore, Subappaltatore e Fornitore, ciascuno nei limiti delle proprie competenze.

I cloruri, sono identificati come quelli disciolti e trasportati dalle acque, per effetto dell'impiego dei sali disgelanti utilizzati sul sistema stradale durante l'inverno. È possibile distinguere l'aggressione del cloruro di sodio, dannoso prevalentemente nei confronti dell'armatura metallica, da quella del cloruro di calcio. Nel primo caso il cloruro, penetrando nella massa del calcestruzzo, raggiunge l'armatura riducendo rapidamente la passivazione dei ferri, anche in condizione di calcestruzzo non carbonatato. In presenza di ossigeno si attiva il fenomeno dell'ossidazione del tondino, definito come "pitting corrosion", non rilevabile attraverso la rottura del conglomerato cementizio e quindi estremamente pericoloso in quanto si può verificare anche una grave riduzione della sezione utile, con possibilità di improvvisi e non prevedibili cedimenti. Occorre, quindi, provvedere alla riduzione della penetrazione dello ione cloro e dell'ossigeno, riducendo la permeabilità del calcestruzzo ed aumentando convenientemente lo spessore del copriferro. Nel secondo caso, il cloruro di calcio reagisce con l'idrato di calcio formando un composito, l'ossicloruro di calcio, ad effetto gonfiante e disgregante. Un'efficace intervento protettivo consiste, in questo caso, nell'utilizzo di un reattivo pozzolanico (fly-ash, condensated silica fume, ecc.), che sottraendo la calce idrosolubile riduce i rischi di danno.

Per quanto riguarda gli aggregati reattivi, si notano sempre più frequentemente reazioni chimiche disgregatrici tra gli aggregati ed il cemento. La reazione più comune, in Italia in particolare lungo la costa adriatica, è quella che si verifica tra alcune forme di silice, quali opale amorfa, calcedonio, ecc. e i componenti alcalini del cemento. Come conseguenza della reazione si forma un gel di silicato alcalino che, assorbendo acqua, si gonfia con formazione di fessurazioni nel calcestruzzo. La reazione non avviene se si elimina l'apporto di acqua e/o si utilizzano cementi contenenti meno dello 0,6% di alcali; altra possibilità di intervento protettivo preventivo è oggi derivata dall'impiego di silice micronizzata, attraverso una rapida pre-reazione tra la silice amorfa, costituente prevalente del reattivo e gli alcali stessi, dovuta all'elevatissima superficie specifica del prodotto (> 150.000 cm²/g). Azione fondamentale è, comunque, la riduzione della permeabilità del conglomerato cementizio.

Gelività e cicli di gelo e disgelo sono azioni aggressive rispetto alle quali persiste una cultura carente, con il risultato di evidenti e spettacolari degradi di opere civili ed industriali un po' in tutta Italia. Forse questa carenza è dovuta alla immagine del nostro paese associata al "sole e caldo", assolutamente non veritiera se si pensa che almeno il 70% del nostro territorio è soggetto a questi problemi.

Come si è visto, la presa e l'indurimento di un legante idraulico sono sensibili al freddo: tra i 20°C ed i 5°C, l'inizio presa può essere sensibilmente ritardato (da due a cinque volte a seconda della natura del cemento). Il rallentamento del successivo indurimento, è soprattutto sensibile al di sotto di 5°C e, a 0°C, l'indurimento è praticamente nullo.

Tuttavia quando la temperatura normale è ristabilita, l'indurimento riprende il suo corso abituale e, se questo stato di cose è previsto in cantiere, l'inconveniente può essere trascurabile in quanto possono essere prese tutte le precauzioni al fine di evitare che l'acqua del calcestruzzo allo stato fresco geli. Se, infatti, abbassandosi la temperatura sotto 0°C l'acqua d'impasto gela, essa subisce una dilatazione che provoca la deformazione reversibile del calcestruzzo non indurito. È, invece, molto importante e nociva l'azione del gelo sul calcestruzzo indurito, in quanto può condurre anche ad una completa disgregazione del solido e l'effetto progressivo dell'azione del gelo-disgelo può essere messo in evidenza determinandone la resistenza a compressione o meglio il modulo elastico.

Secondo la migliore tecnologia del calcestruzzo, è comunque possibile la realizzazione di calcestruzzi perfettamente resistenti al gelo.

Si descrive, per prima cosa, quale è il processo che porta alla disgregazione del calcestruzzo, a seguito delle alternanze dei cicli di gelo e disgelo. Il conglomerato cementizio è formato da aggregati e da una parte attiva, composta da particelle di cemento idratate e bagnate da un certo

quantitativo di acqua, fissata fisicamente e penetrante all'interno dei grani solidi. Questo fenomeno mette in evidenza l'importanza e l'influenza dell'aria inglobata in quanto i vuoti del calcestruzzo giocano un ruolo differente e possono essere classificati in tre modi:

- ✚ vuoti microscopici della pasta cementizia;
- ✚ vuoti capillari;
- ✚ vuoti non capillari.

Si abbia, per esempio, una pasta di cemento bagnata d'acqua sino nei capillari e si abbassi progressivamente la temperatura esterna, misurando le variazioni della lunghezza del provino. Questa lunghezza, diminuisce progressivamente, per contrazione termica, sino ad una temperatura T_i , inferiore a 0°C (Figura 68).

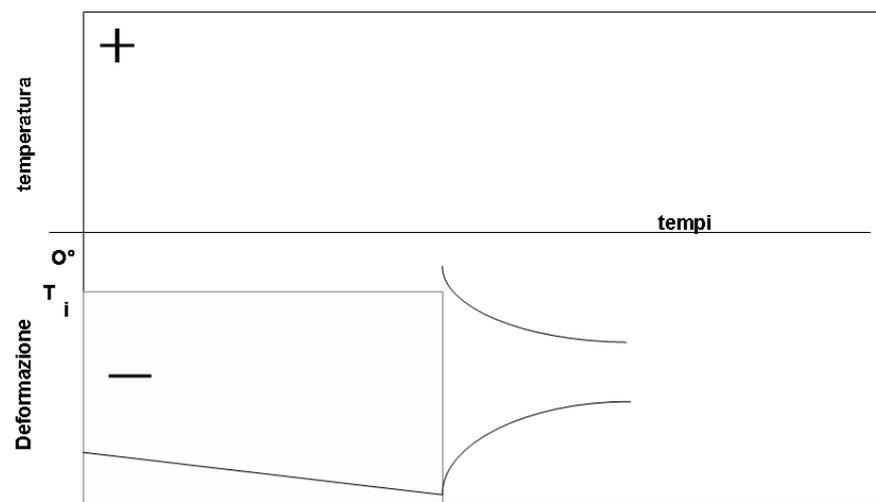


Figura 68 - Variazioni di lunghezza di un provino di calcestruzzo imbibito di acqua, per effetto del gelo.

Si constata, a questo punto, che la contrazione della pasta di cemento si arresta e che si ha una dilatazione repentina per una certa dimensione e successivamente una più lenta. La temperatura T_i , corrisponde al congelamento dei vuoti capillari ed è tanto più bassa quanto sono più ridotti di raggio i capillari stessi. Il congelamento dei capillari determina un aumento di volume dell'acqua in essi contenuta, con conseguente dilatazione, così che l'eccesso di acqua può spostarsi fino ai vuoti d'aria, situati più o meno lontani. In ogni modo il calcestruzzo si rigonfia, come si è potuto osservare e subisce un processo di disgregazione. Quando un calcestruzzo contiene dei vuoti d'aria, fissati sotto forma di bolle microscopiche uniformemente ripartite nella massa, il fenomeno assume un aspetto differente, in quanto l'acqua dei capillari trova un poro d'aria, penetra in esso e gela formando una crosta di ghiaccio lungo la sua superficie, per cui la pressione non può sorpassare un certo limite.

È comprensibile, comunque, che questa protezione non possa essere apprezzabile se non nel caso in cui i pori d'aria siano sufficientemente vicini da determinare un rapido movimento dell'acqua dai capillari ai pori stessi. Questo quantitativo d'aria inglobata, è legato alla dimensione massima dell'aggregato (Tabella 42).

Dimensione massima aggregato (mm)	% aria inglobata
20	$5,0 \pm 1,0$
40	$4,0 \pm 1,0$
75	$3,5 \pm 0,5$
120	$3,0 \pm 0,5$
150	$2,0 \pm 0,5$

Tabella 42 - Tenore di aria inglobata, per mc di calcestruzzo, per assicurare una efficace protezione alle alternanze dei cicli di gelo e disgelo.

Studi determinanti in materia, sono stati effettuati da Powers, che ha dimostrato l'importanza, agli effetti della durabilità del calcestruzzo all'alternanza dei cicli di gelo e disgelo, della ripartizione delle bolle d'aria occluse. È per questo motivo che sono abitualmente adottati additivi aeranti, che inglobano percentuali di aria variabili da 50 a 500 x 10⁶ bolle per litro di conglomerato, con distanze variabili da 0,10 a 0,30 mm.

La determinazione della resistenza di un calcestruzzo alla degradazione, per cicli di gelo e disgelo, è realizzata secondo procedimenti standard: i cicli di gelo sono effettuati in aria, mentre quelli di disgelo in acqua, osservando la degradazione del provino di calcestruzzo secondo il suo modulo elastico, lunghezza e massa. I provini dovranno essere prismatici o cilindrici, in numero di almeno 3 per prova, più 2 per confronto non sottoposti ai cicli, la stagionatura deve essere effettuata per 45 giorni a 20°C ± 2 ed umidità relativa non minore al 90%. Successivamente, saranno mantenuti immersi in acqua a 20°C ± 2, fino a 60 giorni di stagionatura complessiva.

L'apparecchiatura è costituita da un cella, entro la quale si introducono i provini in esame, corredata dai seguenti dispositivi:

- ✚ impianto di raffreddamento e riscaldamento, atto a realizzare, nell'interno della cella, temperature comprese tra - 25°C e + 5°C;
- ✚ programmatore ciclico, in grado di provocare le alternanze di gelo e disgelo;
- ✚ contatore di cicli;
- ✚ impianto di termostattizzazione dell'acqua per il disgelo;
- ✚ misuratori di temperatura, almeno due, per rilevare la temperatura della cella e quella all'interno del campione di riferimento;
- ✚ dispositivi atti ad assicurare un'adeguata circolazione dell'aria.

Sarà inoltre necessario disporre di un misuratore del modulo elastico dinamico, un altro per il modulo elastico statico secante a compressione, un misuratore delle variazioni dimensionali e bilance con precisione del 2%. Il ciclo di gelo e disgelo consiste:

- ✚ nell'abbassare la temperatura dei provini, in aria raffreddata a velocità costante da 5°C a - 25°C;
- ✚ nel mantenere la temperatura a - 25°C;
- ✚ nel riportare e mantenere la temperatura dei provini a 5°C, mediante immissione di acqua termostattizzata.

La durata complessiva del ciclo deve essere almeno di 8, 12, 24 ore, rispettivamente per provini di lato 10, 15, 20 o 30 cm.

Nel resoconto di prova si devono riportare:

- ✚ caratteristiche dell'impasto;
- ✚ dosaggio e tipi di eventuali additivi;
- ✚ contenuto di aria nel calcestruzzo fresco;
- ✚ massa e modulo elastico, dimensione e numero dei provini all'inizio dei cicli di gelo e disgelo;
- ✚ scostamenti dalle temperature nominali prescritte e tempo di durata del ciclo;
- ✚ risultati ottenuti tabellati: modulo elastico, variazioni dimensionali, massa dei provini, messi a confronto con i dati relativi ai campioni testimoni;
- ✚ altre informazioni utili.

La prova si esegue sino a 300 cicli e si può arrestare qualora il materiale subisca una diminuzione del modulo elastico dinamico del 60% od una espansione dello 0,2 ÷ 0,3%, od una perdita di massa maggiore del 3%.

A completamento di questa disamina di alcuni tra i principali aggressivi naturali del calcestruzzo, è possibile riassumere gli effetti che si manifestano ed i rimedi principali che si devono adottare a seconda delle cause che hanno determinato il degrado (Tabella 43). Si rileva che, nella maggior parte dei casi, i danni si manifestano per effetto di azioni espansive del conglomerato cementizio, determinate da reazioni con il legante o per ossidazione delle armature metalliche, anche in abbinamento con la solubilizzazione di alcuni costituenti del cemento e finale disgregazione del calcestruzzo indurito. I rimedi da assumere sono ovviamente vari, quali la scelta di un cemento idoneo, un corretto proporzionamento della miscela, l'impiego di additivi riduttori d'acqua e di reattivi e, nelle situazioni più pesanti, di un adeguato copriferro e di protettivi superficiali.

ATMOSFERA

CAUSE	Anidride carbonica	Anidride solforosa	Acque atmosferiche	Gelo / Disgelo
EFFETTI	Espansione e disgregazione del cls per ossidazione delle armature metalliche.	Solubilizzazione del legante.	Vari a seconda dell'aggressivo trasportato dall'atmosfera.	Espansione e disgregazione del cls per effetto meccanico.
RIMEDI	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; spessore copriferro adeguato; trattamento protettivo superficiale.	Protezione superficiale del conglomerato.	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile.	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; inglobamento di aria.

ACQUE DI CONTATTO

CAUSE	Pure e con CO ₂	Solfatiche	Con cloruri	Marine	Aggregati reattivi
EFFETTI	Solubilizzazione del legante.	Espansione del cls e sua disgregazione.	Espansione e disgregazione del cls per ossidazione delle armature metalliche.	Disgregazione per espansione; abrasione ed erosione.	Espansione del cls e sua disgregazione.
RIMEDI	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; cemento idoneo; spessore copriferro; trattamento protettivo superficiale.	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; cemento idoneo;	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; spessore copriferro idoneo; cemento idoneo;	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; spessore copriferro idoneo; cemento idoneo;	Basso rapporto a/c; cls compatto; cls impermeabile; cemento idoneo; aggregati non reattivi;

Tabella 43 - Effetti e rimedi essenziali da adottare per la durabilità del calcestruzzo nei confronti delle aggressioni naturali.

Esiste, comunque, un comune denominatore tra tutti i casi analizzati: la limitazione del rapporto a/c e la massima compattezza del calcestruzzo indurito, quindi la riduzione della sua permeabilità all'acqua ed ai gas.

Resistenze meccaniche del calcestruzzo

Il calcestruzzo, quando la sollecitazione supera la resistenza a compressione subisce una rottura per disgregazione dei suoi costituenti, in quanto trattasi di un materiale disomogeneo. Gli studi di Féret hanno dimostrato che la resistenza meccanica di un conglomerato cementizio indurito è dovuta, in maniera preponderante, dalla resistenza della pasta cementizia, più che da quella degli aggregati.

Dalle sue esperienze risulta infatti evidenziato che, mantenendo costanti, a parità di tipo di cemento impiegato, le caratteristiche della pasta cementizia sono date da:

$$C / a + v$$

(4.10)

dove:

-  **C** è il volume assoluto del cemento;
-  **a** è il tenore di acqua d'impasto;
-  **v** è il volume totale dei vuoti sotto forma di pori capillari.

Utilizzando aggregati molto diversi gli uni dagli altri, le resistenze a compressione del calcestruzzo indurito variano di non più del 10%. Malgrado si rendano evidentemente necessari, per l'impiego di aggregati così diversi, energie di costipamento molto variabili, l'influenza sulle caratteristiche finali del calcestruzzo indurito è dovuta principalmente alla compattezza della pasta cementizia o pietra di cemento che, come abbiamo già visto, è condizionata essenzialmente dal rapporto acqua:cemento.

È noto, infatti, che la quantità di acqua fissata a seguito dell'idratazione del legante è molto limitata (Fig. 69) e che l'acqua in eccesso, necessaria per il raggiungimento di una buona lavorabilità dell'impasto, evaporando provoca la formazione di pori capillari e di conseguenza un calcestruzzo poco compatto e meno resistente.

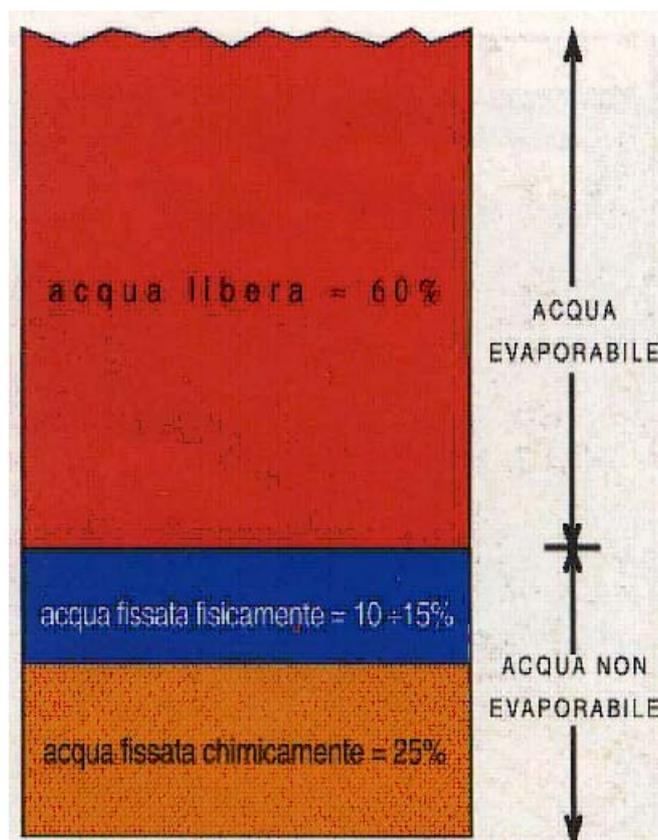


Figura 69 – Il calcestruzzo: acqua evaporabile ed acqua non evaporabile in % sul cemento.

L'influenza del rapporto a/c è più sensibile nei confronti della resistenza a compressione, che nei confronti della resistenza a flessione, che diminuisce in modo inferiore con l'aumento dell'acqua d'impasto.

Questo diverso comportamento si spiega in quanto, sino al momento nel quale non appaiono fessurazioni, il ritiro esercita sui provini uno sforzo di precompressione, che si aggiunge agli sforzi di compressione e si sottrae alla tensione di trazione.

È, inoltre, molto importante la relazione che esiste tra la resistenza e i tempi di indurimento, in funzione del rapporto a/c, in quanto l'incremento delle resistenze è tanto più rapido quanto più ridotti sono i valori del rapporto a/c stesso.

Oltre all'influenza, determinante, del rapporto acqua:cemento, esistono altri fattori che influenzano, sia pure più limitatamente o in casi particolari, le resistenze meccaniche del calcestruzzo o il loro sviluppo nel tempo.

Si consideri, per primo, la conservazione del cemento, elemento di importanza trascurabile nel caso di grandi opere o di produzioni continue, in quanto il cemento resta nell'ambiente di stoccaggio per un tempo limitato, ma che può assumere un'influenza più sentita per l'esecuzione di piccole opere, per le quali viene normalmente impiegato in sacchi, acquistato prevalentemente presso rivenditori e quindi conservato in condizioni non ottimali e sovente per lunghi tempi. Come

ampiamente descritto da importanti autori, il processo di invecchiamento del cemento consiste in una progressiva preidratazione dei granuli, a seguito della quale si libera un certo quantitativo di calce e di conseguenza in una sua lenta decomposizione (formazione di grumi). Si può considerare che, mediamente, la diminuzione della resistenza meccanica, di un dato cemento conservato in sacchi, può essere, dopo circa un anno, del 25 ÷ 40% e dopo quattro anni del 50 ÷ 60% (Figura 70).

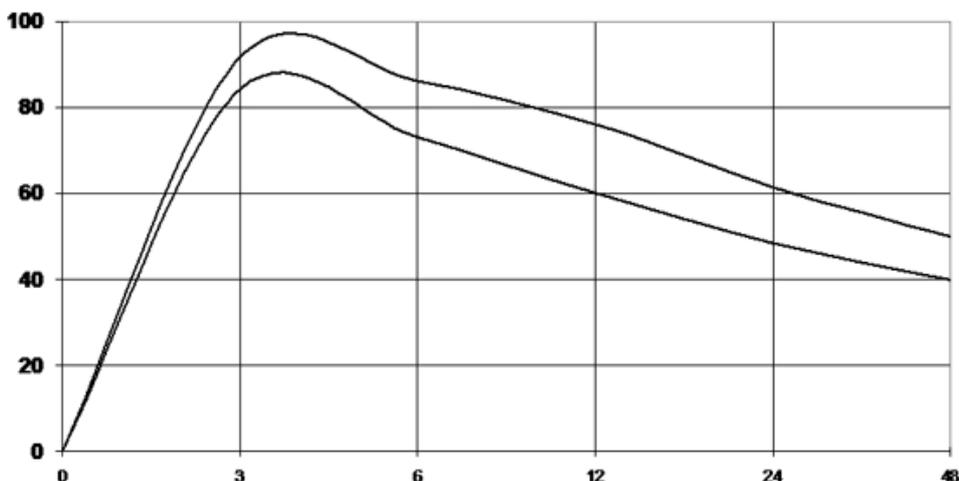


Figura 70 - Riduzione percentuale della resistenza del cemento, con diversi invecchiamenti, rispetto al cemento fresco.

Il secondo elemento che influisce sullo sviluppo delle resistenze meccaniche è il tipo di stagionatura, la temperatura e l'umidità dell'ambiente di maturazione. Sappiamo già che la temperatura e l'umidità esercitano un'influenza marcata sullo sviluppo della qualità di un calcestruzzo, soprattutto quando questo è giovane in quanto una temperatura bassa rallenta mentre una alta accelera il processo d'indurimento che, stante la natura idraulica del cemento, non può avvenire se non in un ambiente umido.

Sull'influenza dell'umidità si ricorda che, essendo ormai stabilito che l'incremento della resistenza è massimo nelle prime settimane, un essiccamento prematuro del calcestruzzo interrompe, in grande misura, l'aumento della resistenza stessa (vedi Capitolo XI).

Si osserva che le resistenze dei provini maturati in ambiente secco, possono dare valori superiori a basse stagionature, ma che queste resistenze sono ben presto superate da quelle di provini maturati in ambiente umido. Sarà quindi necessario mantenere i provini in ambiente protetto, per almeno una settimana, aumentando questo tempo nel caso di temperature calde o con umidità relativa bassa, soprattutto per elementi poco voluminosi o con elevate superfici esposte. Provini cubici di malta cementizia, con un lato pari a 7 cm, maturati per tutto il tempo di stagionatura in ambiente secco hanno dato, a 28 giorni, circa il 50% delle resistenze ottenute con provini maturati in ambiente umido.

Ancora maggiore importanza, per lo sviluppo delle resistenze di un calcestruzzo, ha la temperatura di maturazione, considerando che non si tiene conto dell'influenza di questo fattore sui tempi di presa, argomento già trattato nel Capitolo II, bensì sull'indurimento dell'impasto nel tempo.

Una diminuzione della temperatura, per esempio vicino a 0°C, si traduce in un netto rallentamento dell'indurimento; questo fenomeno, particolarmente importante nel periodo iniziale, si spiega con una forte riduzione dell'attività dell'acqua nella sua reazione chimica con il cemento.

Per una temperatura ambiente di 0°C si verifica un prolungamento della reazione di idratazione del cemento, che si accompagna comunque ad uno sviluppo di calore, per cui il calore latente di congelamento, impedisce ugualmente che il punto critico scenda a 0°C. Ne deriva che il congelamento dell'acqua all'interno del calcestruzzo non si verifica al raggiungimento della temperatura di 0°C, bensì ad una temperatura leggermente inferiore e quindi, in queste condizioni, si ha un ulteriore indurimento dell'impasto, benché fortemente rallentato.

Questo comportamento è diversamente influenzato dalla natura del cemento impiegato: un cemento, contenente un'elevata proporzione di elementi di clinker fortemente basici, aumenta sensibilmente le resistenze iniziali, mentre un cemento di clinker poco attivo o contenente prodotti di additivazione finemente macinati, alla temperatura di 0°C rallenta, più nettamente, l'indurimento delle malte e dei calcestruzzi.

La resistenza di un calcestruzzo, in funzione della temperatura ambiente e del tempo di maturazione, si può prevedere con la formula:

$$M_n = Th (T^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) \quad (5.10)$$

dove

- ✚ M_n espresso in °C per ore, è il grado di maturazione;
- ✚ Th è la durata della maturazione in ore;
- ✚ $T^{\circ}\text{C}$ è la temperatura media di maturazione in °C.

Questa formula si basa sulla teoria che solamente ad una temperatura di -10°C si ha un completo annullamento dell'incremento dell'indurimento del calcestruzzo.

Se si vuole valutare percentualmente il grado di maturazione di un calcestruzzo stagionato per 672 ore (28 giorni) ad una temperatura media di 5°C, rispetto ad un calcestruzzo che, nello stesso periodo di tempo, sia stato maturato ad una temperatura media di 20°C, si ha:

- ✚ $M_5 = \text{ore } 672(5^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 10.080^{\circ}\text{C per ore};$
- ✚ $M_{20} = \text{ore } 672.(20^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}) = 20.160^{\circ}\text{C per ore};$

e quindi

$$\%M = (M_5/M_{20}) \times 100 = (10.800/20.160) \times 100 = 50\%$$

La Figura 71 indica le diverse percentuali di maturazione di calcestruzzi stagionati a diverse temperature, nei confronti di un calcestruzzo maturato a 20°C, mentre dalla Figura 72 si può rilevare dopo quale stagionatura, nelle varie condizioni di maturazione, si raggiungeranno le stesse resistenze del provino maturato per 28 giorni a 20°C.

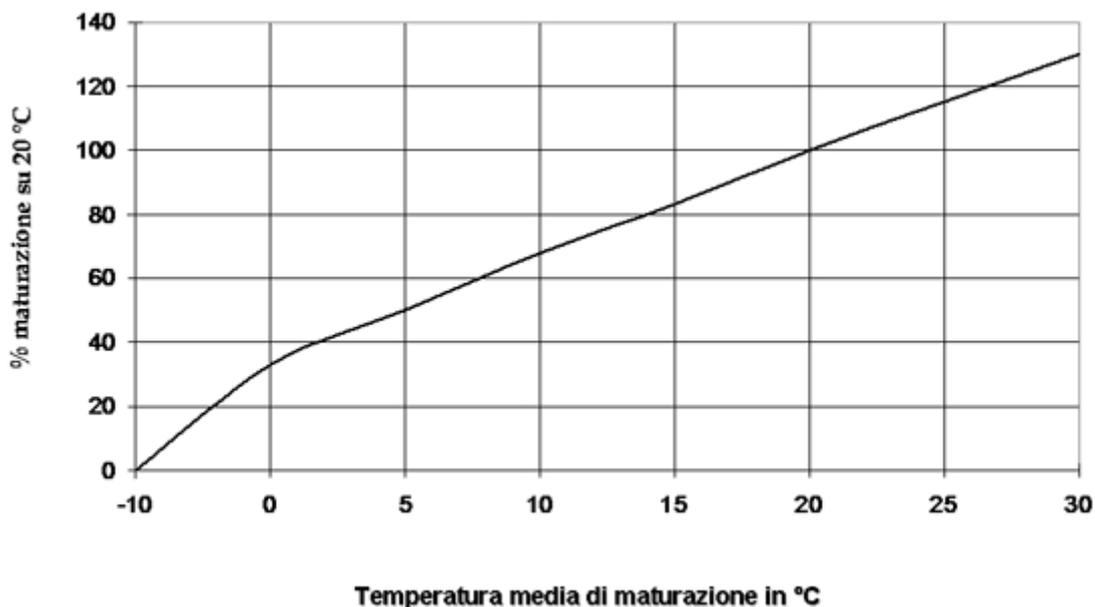


Figura 71 - % del grado di maturazione di calcestruzzi, maturati a diverse temperature, rispetto ad uno maturato a 20°C.

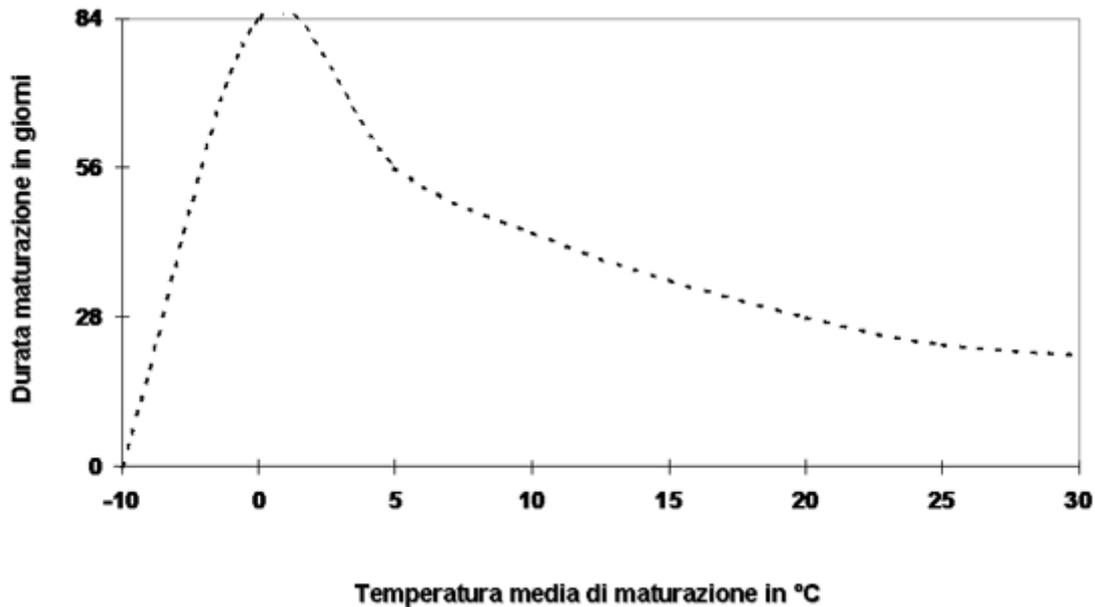


Figura 72 - Durata della stagionatura per raggiungere, a diverse temperature di maturazione, la resistenza di un provino maturato a + 20°C per 28 giorni.

Resistenza alla compressione

La prova di rottura a compressione è quella che si utilizza più frequentemente, come criterio per valutare la qualità del calcestruzzo; normalmente viene effettuata su provini cubici, cilindrici o prismatici.

Secondo la normativa italiana, i provini da utilizzare per questa prova, devono essere cubici, di lato proporzionale alla dimensione massima degli aggregati, come indicato nel seguente prospetto.

dimensione max inerte	mm	fino a 16	oltre 16	oltre 31.5	oltre 63	oltre 125
lato del provino	mm	100	150	200	250	300

Il prelevamento dei campioni di calcestruzzo in cantiere, può essere effettuato da un impianto di betonaggio, da autobetoniera o all'impiego (Fig. 73). Il quantitativo da prelevare deve avere un'eccedenza di almeno il 20%, rispetto al fabbisogno. Nel caso una betoniera abbia una capacità massima di 0,5 mc, il prelievo può essere effettuato in una unica soluzione a metà dello scarico; mentre per betoniere di capacità superiore o autobetoniere, il prelevamento deve essere effettuato in tre riprese, ad intervalli di tempo all'incirca uguali e quindi a 1/4, 2/4 e 3/4 dello scarico, curando di intercettare l'intero flusso del calcestruzzo, al fine di evitare dispersioni di materiale.

Si ricorda infine che, il prelevamento dal getto in opera, richiesto normalmente per grandi opere come dighe, opere marittime, ecc., viene effettuato in tre punti ben distinti, sulla superficie del getto, e che i tre prelievi devono essere accuratamente rimescolati.

La preparazione dei provini, consiste nel sistemare il calcestruzzo in apposite casseforme, assestandolo con opportuni mezzi di costipamento. Il calcestruzzo fluido o plastico può essere costipato, per mezzo di un tondino di ferro, in tre strati, mentre per i calcestruzzi asciutti è opportuno l'impiego di vibratori a banco o ad immersione, sino ad incipiente rifluimento della malta. A questo proposito si ricorda l'influenza della costipazione del calcestruzzo, agli effetti delle resistenze finali, specialmente nel caso di prelievi da impasti plastici od asciutti (Figura 74).

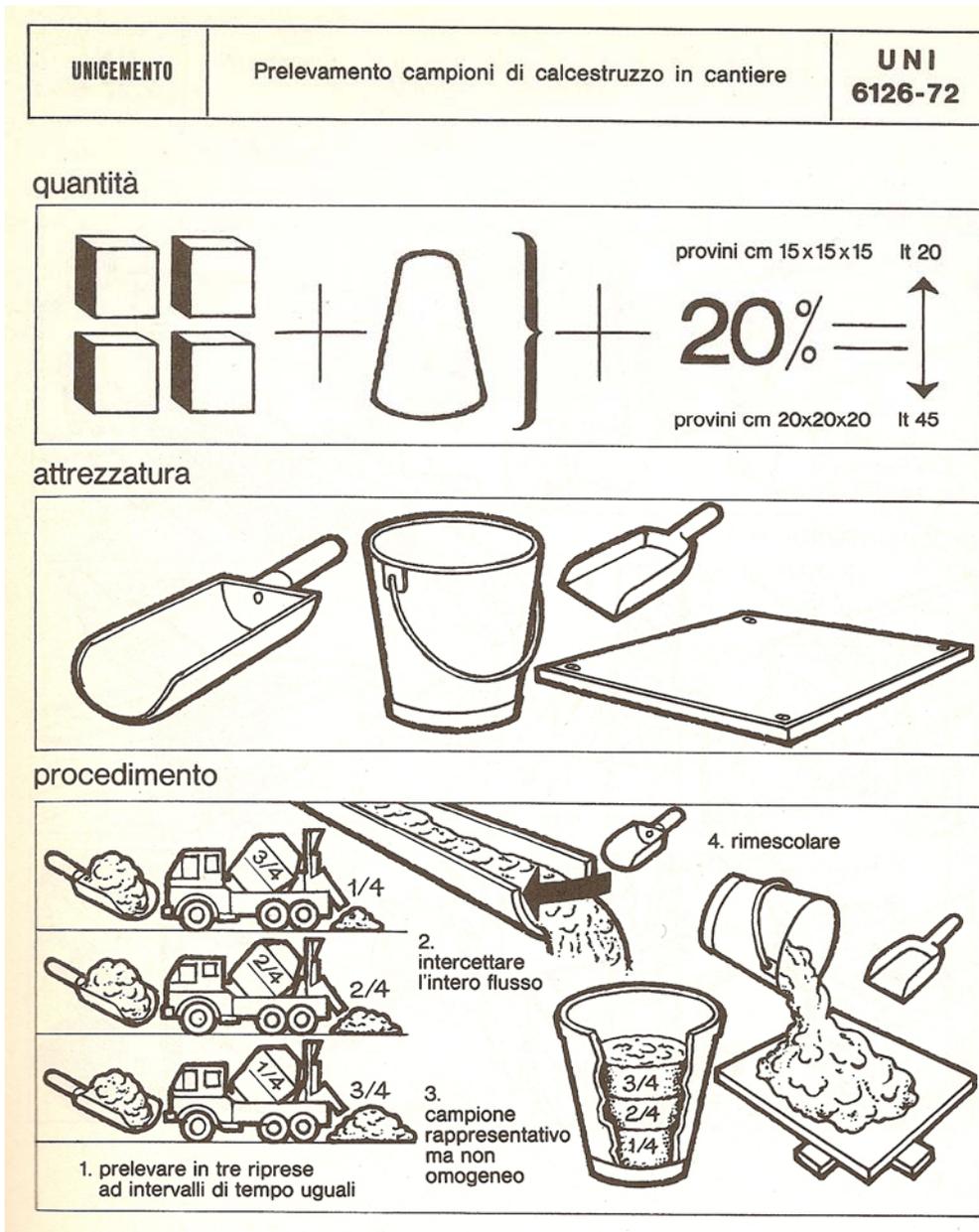


Figura 73 - Prelievo di calcestruzzo per il confezionamento dei provini (da UNI 6126-72).

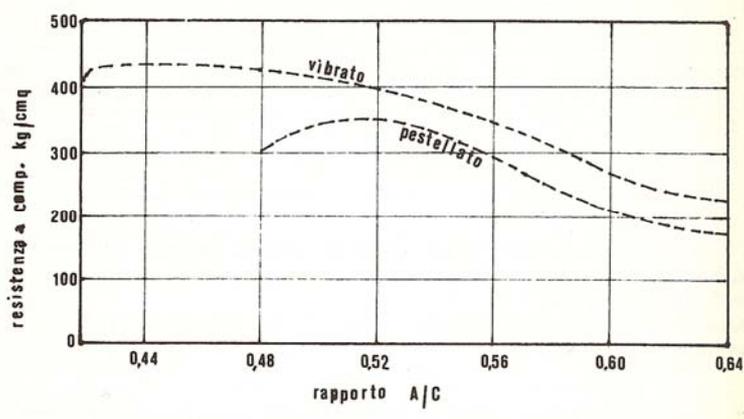


Figura 74 - Resistenze a compressione, su cubi vibrati e pestellati, in funzione del rapporto a/c - prove secondo Walz.

Come si può rilevare, la differenza di resistenza è sensibile per i provini confezionati con impasti a consistenza asciutta e limitata per calcestruzzi fluidi.

Una fase estremamente importante nel controllo della resistenza è la stagionatura dei provini, che si possono suddividere in due tipi, secondo le finalità della prova:

- ✚ stagionatura in condizioni definite di temperatura e umidità. Si tratta del metodo normalizzato che prevede che i provini vengano conservati alla temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ e con umidità relativa non minore del 90%;
- ✚ stagionatura nelle condizioni ambientali delle strutture, oppure stagionatura accelerata o in condizioni particolari. Queste vengono adottate per determinate condizioni ambientali od operative e le modalità devono essere concordate preventivamente.

I mezzi meccanici, impiegati per l'esecuzione delle prove di rottura a compressione, sono le presse, di tipo e caratteristiche normalizzate; il procedimento consiste nel collocare i provini, previa eventuale spianatura delle facce per mezzo di un'apposita rettifica o mediante l'applicazione di miscela di zolfo e sabbia, ecc., tra i piatti della pressa, in modo che il carico venga applicato normalmente alla direzione di costipamento.

Si dovrà quindi aumentare gradualmente lo sforzo di compressione, con un gradiente di carico che dovrà corrispondere a $0,5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ al secondo.

Il valore unitario della rottura a compressione, espresso in N/mm^2 sarà pertanto dato da:

$$R_c = P/A \quad (6.10)$$

dove:

- ✚ **P** è il carico massimo raggiunto, espresso in N;
- ✚ **A** è l'area della faccia del provino a contatto con il piatto della pressa, espresso in mm^2 .

La rottura dei provini dovrebbe sempre avvenire in modo uniforme e simmetrico e l'aspetto del cubetto rotto dovrà essere, in questo caso, quasi lo stesso sui quattro lati. Operando con un martello sul cubo sottoposto alla prova, lo stesso dovrà assumere, frantumandosi, la caratteristica forma a piramide.

Ogni tipo di rottura diverso da quello indicato è sintomo di anormalità e le cause di una rottura anomala, possono essere molteplici, come ad esempio:

- ✚ forma non perfettamente regolare dei cubi, dovuta ad un difetto della cassaforma;
- ✚ errato posizionamento dei provini sotto la pressa e quindi mancanza di coassialità tra il cubo e l'asse della pressa stessa;
- ✚ difetto meccanico della pressa;
- ✚ difetto di costipamento del provino e quindi mancanza di omogeneità del calcestruzzo.

Come si è precedentemente visto, sono previste diverse dimensioni dei provini, cubici o cilindrici, in funzione della dimensione massima dell'aggregato. A parità di calcestruzzo, infatti, le variazioni del lato del provino o le sue diversità di forma (cubica o cilindrica), influenzano i risultati delle prove a compressione, che quindi non possono essere perfettamente paragonabili tra di loro. Se ad esempio si confezionassero, con un dato calcestruzzo, provini di diverso lato e forma, le variazioni della resistenza, rispetto ad un provino standard, di lato o diametro di 150 mm, sarebbero quelle riportate nelle Tabelle 44 e 45.

Se quindi abbiamo un valore R_{cX} della rottura a compressione di un provino di lato o diametro X, il valore corrispondente di un provino di lato o diametro di mm 150, sarà dato da:

$$R_{c150} = R_{cX}/f \quad (7.10)$$

lato cubo in mm	100	150	200	250	300
coefficiente di correzione f	1,10	1,00	0,95	0,92	0,9

Tabella 44 - Coefficiente di correzione dei valori delle resistenze meccaniche a compressione, su provini cubici, in rapporto ad un cubo di lato di 150 mm.

dimensioni del cilindro in mm	100x200	150x300	200x400	250x500	300x600
coefficiente di correzione f	1,02	1,00	0,97	0,95	0,92

Tabella 45 - Coefficiente di correzione dei valori delle resistenze meccaniche a compressione, su provini cilindrici in rapporto ad un cilindro del diametro di 150 mm.

Quindi se, per esempio, si rileva un valore alla compressione di 37,0 N/mm² per un provino di lato 10 mm si ha:

$$R_{c150} = N/mm^2 (37,0/1,10) = 33,6 N/mm^2.$$

Se lo stesso valore, invece, è ottenuto con un provino di lato di 300 mm si ha:

$$R_{c150} = N/mm^2 (37,0/0,90) = 44,1 N/mm^2.$$

Il fenomeno è da attribuirsi, in minima parte, ad un diverso effetto parete del calcestruzzo costipato nei provini e, in modo determinante, al contrasto praticato dal piatto della pressa nei confronti della dilatazione trasversale dei provini stessi sotto carico, superiore nel caso di cubi di lato piccolo e, di conseguenza, ad un'azione di "fasciatura" degli stessi.

Per ultimo, si indica il rapporto tra le resistenze a compressione di provini cubici e cilindrici, aventi la stessa dimensione (lato = diametro):

- ✚ per resistenze $\leq 25 N/mm^2 = 1,25$;
- ✚ per resistenze $> 25 N/mm^2 = 1,18$.

CAPITOLO XI

POMPAGGIO, COMPATTAZIONE E STAGIONATURA PROTETTA DEL CALCESTRUZZO

Essere esperti di produzione del calcestruzzo, comporta non solo la conoscenza della sua tecnologia, analizzare i suoi componenti e proporzionarli correttamente, ma significa anche conoscere le modalità di trasporto del conglomerato cementizio, della messa in opera e della stagionatura. Purtroppo, non sempre questi aspetti sono presi in considerazione in un unico insieme, per cui è illuminante la considerazione che nasce a seguito di un'indagine condotta tempo fa dal CRESME nell'ambito delle attività di una campagna inter-associativa sul calcestruzzo di qualità, promossa da AITEC, ANCE, ASSIAD, ASSOBTETON ed ATECAP: **la sfiducia del Committente nei confronti della qualità del conglomerato cementizio è, in buona parte, conseguenza della incapacità o trascuratezza, da parte dell'Esecutore, di assicurare la corretta messa in opera e stagionatura protetta del calcestruzzo stesso.** È, quindi, pleonastico disquisire di durabilità, mix design e prestazioni di questo essenziale materiale da costruzione, se poi il lavoro del Tecnologo e del Produttore qualificato viene vanificato nella fase esecutiva.

Il pompaggio del calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale caratterizzato da un'alta duttilità d'impiego, le cui prestazioni allo stato fresco, dopo la miscelazione, ne consentono il trasporto e la messa in opera con diversi sistemi, dal cassone protetto all'autobetoniera, dalla benna al nastro trasportatore. In questo Capitolo, si vuole analizzare il metodo più moderno e funzionale di trasporto e posa in opera, nato circa 100 anni or sono, a mezzo di sistemi pompanti. Il presupposto del sistema, che ha portato al grande sviluppo del volume del calcestruzzo messo in opera con pompa, oggi superiore al 60% del Ready Mix Concrete, è stato l'accoglimento, da parte delle aziende produttrici di macchinari, di alcune richieste quali:

- ✚ rapidità di piazzamento, così da garantirne la redditività anche per brevi periodi d'impiego e ridotti volumi di calcestruzzo da mettere in opera;
- ✚ utilizzo di motori indipendenti dalle risorse di energia locali e adozione dei variatori di velocità;
- ✚ basso livello della tramoggia di carico, al fine di consentire lo scarico del calcestruzzo direttamente dalle autobetoniere;
- ✚ impiego di tubazioni leggere, al fine di ridurre i tempi di montaggio e smontaggio;
- ✚ equipaggiamento con bracci idraulici, per un'ulteriore velocizzazione della messa in opera, con riduzione dell'incidenza della mano d'opera.



Figura 75 – Pompaggio del calcestruzzo.

Per mettere in opera un calcestruzzo per mezzo di una pompa, è importante individuare i concetti generali, legati al sistema calcestruzzo/pompa; pertanto occorre considerare non solo i problemi legati alla macchina, bensì anche gli importanti risvolti collegati alla composizione dell'impasto, che deve essere studiato in modo specifico tenendo conto di alcuni aspetti fondamentali:

- ✚ il calcestruzzo pompato deve essere forzato attraverso una tubazione, per mezzo di un sistema a pistoni o peristaltico, che produce un determinato gradiente di pressione;
- ✚ l'attrito del calcestruzzo sulle pareti delle tubazioni di convogliamento non deve assumere alti valori, pena il bloccaggio dell'operazione, con la formazione del famigerato "tappo";
- ✚ il calcestruzzo pompato deve scorrere, anche per lunghe distanze, sia orizzontalmente che verticalmente, attraverso curve, raccordi e giunzioni delle tubature;
- ✚ il diametro massimo dell'aggregato, non deve essere superiore ad 1/3 di quello della tubazione di trasporto (Figura 76).

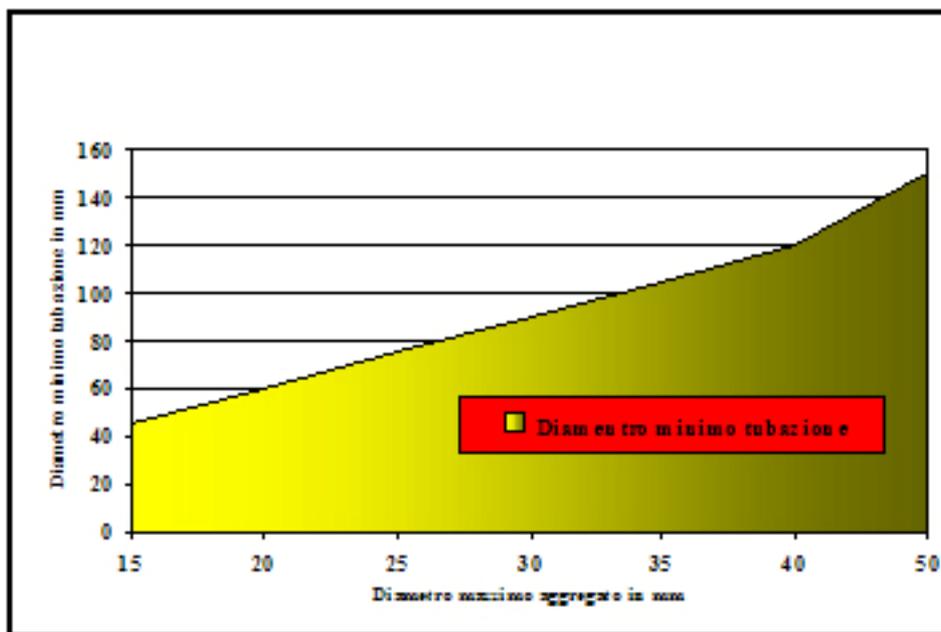


Figura 76 – Diametro minimo della tubazione in funzione del diametro massimo dell'aggregato.

I requisiti fondamentali per l'ottimizzazione della miscela da pompare, sono quelli della sua omogeneità e della sua consistenza:

- ✚ omogeneità per ridurre i rischi di blocco del sistema pompa, che causano la formazione di tappi;
- ✚ consistenza congrua, tale da assicurare il corretto scorrimento del calcestruzzo nelle tubazioni.

Vari studi ed esperienze relative al trasporto del conglomerato cementizio per mezzo di pompe, hanno dimostrato che solo un calcestruzzo omogeneo e compatto (questo non vuole dire rigido), nella cui sezione non si producano movimenti controcorrente, viene spinto lungo la tubazione; questo genere di trasporto è definito come a "scorrimento per blocchi", in quanto ogni blocco di calcestruzzo, corrispondente al volume di ogni mandata, scivola lungo il tubo, circondato da una pelle lubrificante formata dalla pasta legante (Figura 77). Il concetto di scorrimento per blocchi e della lubrificazione delle pareti delle tubazioni, ha consentito di risolvere un certo numero di problemi inerenti il pompaggio e, tra questi, quello della formazione di tappi quale risultato della distruzione inattesa del film lubrificante, il cui spessore gioca un ruolo primario e deve corrispondere, approssimativamente, ad 1/7 del diametro dei grani più grossi (Figura 78). Quando il film è scarso, si produce maggiore attrito fra gli aggregati grossi e la parete della tubazione mentre, quando è in eccesso, gli stessi grani iniziano a ruotare su se stessi, provocando una turbolenza a vortice, che determina maggiore resistenza all'avanzamento e, in un tempo più o meno breve, il blocco del pompaggio del calcestruzzo. Premesso che si deve porre particolare

attenzione alla proporzione delle particelle fini nella miscela da pompare, che devono essere presenti in quantità sufficiente per chiudere i vuoti tra gli aggregati grossi e formare il film lubrificante, la qualità e quantità di pellicola dipende, in primo luogo, dal tenore di cemento e di fillers nel calcestruzzo fresco, tanto che si può affermare che per ogni situazione esiste un valore ottimale, compreso tra un limite inferiore ed uno superiore, che è influenzato anche dal diametro della tubazione di trasporto; in effetti, la quantità e quindi lo spessore del film, si accresce in funzione lineare col diametro della tubazione stessa, in quanto la quantità di calcestruzzo in passaggio aumenta al quadrato.

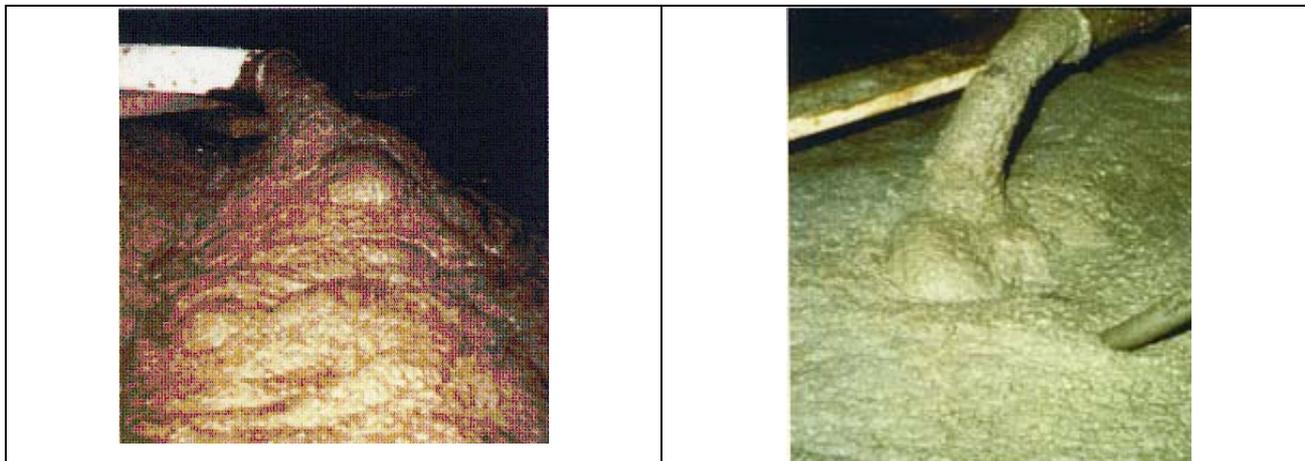


Figura 77 – Trasporto del calcestruzzo “soft” per blocchi.

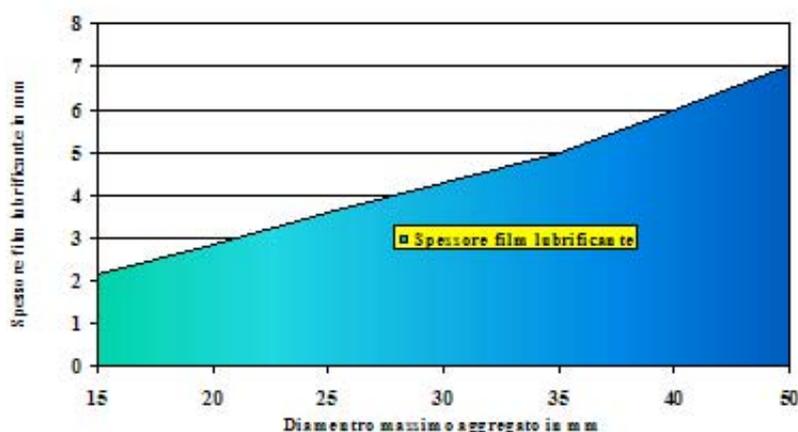


Figura 78 – Spessore del film lubrificante in funzione del diametro massimo dell’aggregato.

Il corretto proporzionamento, o mix design, dei costituenti della miscela, deve inoltre essere mirato alla sua stabilità, in quanto bisogna prevenire il rischio di segregazione del calcestruzzo, che è determinato dalla separazione dell’acqua e dalla sedimentazione dei granuli di aggregato più grossi; questo aspetto è comunemente affrontato dal Tecnologo per tutte le miscele di calcestruzzo, ma assume maggiore importanza nel caso in cui sia previsto il pompaggio, in quanto con questo sistema di trasporto non si ha un continuo rimescolamento del calcestruzzo nelle tubazioni e quindi le segregazioni sono più probabili.

In linea di massima, la pasta legante è la componente che deve essere più equilibrata, tale da assicurare la qualità finale del conglomerato cementizio, sia allo stato fresco, sia a quello indurito.

In particolare si dovrebbe utilizzare un legante (solo cemento) o un sistema legante più filler (per esempio cemento più ceneri), caratterizzato da un buon potere di trattenimento dell’acqua,

ricordando che questa proprietà dipende essenzialmente dalla finezza delle polveri, quindi dalla loro superficie specifica. Il legante ottimale è quello costituito da una miscela di clinker di Portland più aggiunte reattive finemente macinate, realizzate direttamente in cemeniera (vedi CEM IV) o anche miscelando, in centrale di betonaggio, il legante con aggiunte fini.

Gli aggregati giocano un ruolo importante sulle caratteristiche di pompabilità del calcestruzzo, in particolare per la corretta quantità di finissimo delle sabbie e quindi della frazione granulometrica passante sotto il vaglio da 0,125 mm. La forma ideale dell'aggregato per il pompaggio è quella tondeggiate, anche se è comunque possibile pompare con facilità materiale proveniente da frantumazione, a patto che sia prevalentemente poliedrico e che, quindi, non contenga elevate percentuali di granuli a forma piatta e aghiforme.

Il parametro da verificare è il coefficiente di forma C, dato dal rapporto tra il volume effettivo del granulo in esame e quello della relativa sfera circoscritta, secondo la relazione:

$C = V/\pi d^3$, dove V è il volume effettivo e d è il diametro massimo di ogni elemento in esame.

A titolo informativo, le norme francesi classificano lamellare un aggregato con coefficiente di forma $\leq 0,07$ e aghiforme quello con coefficiente di forma $\leq 0,01$.

Forma	Ottima	Buona	Minima	Lamellare	Aghiforme
Coefficiente C	0,40	0,30 – 0,40	0,15	0,07	0,01

Nel caso di impiego di aggregato frantumato, bisogna tenere conto che per riempire i vuoti tra i diversi granuli e avere un sufficiente film lubrificante, è necessaria una maggiore quantità di pasta legante, avendo questi aggregati una superficie più elevata rispetto a quella dei tipi tondeggianti (Tabella 46); per aggregati con coefficiente di forma particolarmente sfavorevole, le superfici riportate in Tabella possono essere maggiorate con un coefficiente variabile tra 1,5 e 2 (nei casi estremi).

Frazione (mm)	Tondi	Frantumati
	Superficie specifica (mq/kg)	Superficie specifica (mq/kg)
0,01 - 0,1	80,00	100,00
0,1 - 0,15	28,20	37,70
0,15 - 0,25	17,50	23,40
0,25 - 0,5	9,80	13,10
0,5 - 1,0	4,60	6,20
1,0 - 2,0	2,30	3,10
2,0 - 4,0	1,15	1,60
4,0 - 8,0	0,58	0,77
8,0 - 15,0	0,31	0,40
15,0 - 30,0	0,16	0,21
30,0 - 60,0	0,08	0,11
60,0 - 120,0	0,04	0,05

Tabella 46 – Superfici specifiche di classi di aggregati tondi e frantumati.

In linea di massima, si deve considerare che la quantità di finissimi, data dalla sommatoria del cemento, degli eventuali filler aggiunti e di quanto apportato dagli aggregati (passante sotto 0,125 mm), deve essere:

- ✚ da 375 a 400 kg/mc con aggregato D_{max} 32 mm;
- ✚ da 425 a 450 kg/mc con aggregato D_{max} 16 mm;

dove il primo valore è per aggregato tondeggiate, mentre il secondo per quello frantumato.

Agli effetti delle sue caratteristiche reologiche, al contrario di una diffusa convinzione, il calcestruzzo pompato ideale non dovrebbe essere eccessivamente fluido, bensì soft, con slump compreso tra 160 e 180 mm e con un fattore di compattazione (secondo DIN 1045) tra 1,05 e 1,03 (il fattore di compattazione 1,00 si ha con slump \geq 210 mm).

Quanto sopra è verificato nel caso di una produzione di calcestruzzi normali, senza aggiunta di additivi riduttori d'acqua di alta efficacia, i superfluidificanti, e/o di agenti coesivizzanti/viscosizzanti, in quanto un ruolo determinante è rappresentato dalla composizione della pasta legante, che deve assicurare durante il pompaggio, la qualità della pellicola lubrificante.

I superfluidificanti sono oggi arrivati a prestazioni decisamente elevate, sia in termini di fluidificazione e riduzione del rapporto a/c, che di mantenimento della fluidità nel tempo, caratteristica questa molto importante per evitare l'aggiunta di acqua in cantiere, la cosiddetta ritemperatura, con la quale si determina un effetto molto negativo, consistente nella eccessiva diluizione della pasta cementizia, tanto che l'acqua stessa può essere compressa nel senso delle linee di carico idraulico, quindi verso la parte terminale delle tubazioni; in questo caso i grani di aggregato grosso si concentrano, portando al blocco delle tubazioni stesse.

Sovente, il Produttore di calcestruzzo si trova nell'impossibilità di reperire economicamente aggregati caratterizzati da forma e contenuto di finissimi corretti, per cui viene vanificata la possibilità di pompare calcestruzzi che non siano ad alto dosaggio di cemento o non contengano aggiunte reattive, comunque costose; a questo sopperiscono i coesivizzanti o viscosizzanti, detti a volte anche coadiuvanti di pompaggio, che generalmente hanno l'effetto di aumentare la viscosità dell'acqua, frenandone la tendenza a disperdersi. Nati come derivati della cellulosa, che richiede maggiore quantità di acqua e può determinare indesiderati ritardi nei tempi di presa e indurimento della pasta legante, oggi si basano su formulati di diversa natura, molto più efficaci e senza effetti collaterali negativi. I nuovi materiali consentono il facile pompaggio anche di calcestruzzi prodotti con aggregati carenti di finissimi, con ridotti dosaggi di cemento e quindi con una pasta legante povera e volumetricamente limitata; l'esperienza diretta dimostra che si possono pompare, senza eccessiva difficoltà, sia miscele con solo 200 kg/mc di legante, costituito da 180 kg/mc di cemento e 20 kg/mc di filler inerte passante sotto 0,125 mm, sia miscele particolarmente studiate per il trasporto, in tubazioni di lunghezza sino a 1.200 m in orizzontale o di più di 300 m in orizzontale con più di 500 m in verticale.

Da ultimo, un cenno sull'impiego di additivi aeranti, una volta utilizzati anche come sostitutivi del finissimo dell'aggregato, in quanto per ogni 1% di aria inglobata si possono rimpiazzare da 15 a 20 litri di finissimi per mc. Oggi queste sostanze non sono più usate per questo scopo, in quanto sostituite vantaggiosamente dai coesivizzanti, ma sono ancora molto importanti per il soddisfacimento delle prescrizioni composizionali della UNI EN 206-1, relativamente alle classi di esposizione ambientale XF (attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza disgelanti); agli effetti del pompaggio è utile ricordare che la percentuale di aria inclusa non dovrebbe superare il 5%. In caso contrario le bollicine, inglobate a pressione atmosferica, sono compresse nei cilindri della pompa e nelle tubazioni per effetto della pressione esercitata dai pistoni, per cui si ha una perdita di plasticità della miscela e, nel caso di tubazioni lunghe, la riduzione di volume che si ha per effetto della stessa pressione, può addirittura assorbire il movimento del pistone della pompa, con conseguente impossibilità di avanzamento del calcestruzzo.

Per concludere, si riassumono alcuni concetti fondamentali che devono indirizzare il Tecnologo nella scelta dei componenti del calcestruzzo pompabile e nel suo proporzionamento:

- ✚ in accordo con la maggior parte delle norme, il contenuto di cemento deve essere di almeno 300 kg/mc (con aggregato con $D_{max} \leq 32$ mm);
- ✚ nel caso di aggregato frantumato, il valore di cui sopra deve essere aumentato del 10%, a causa della superiore superficie specifica dei granuli;
- ✚ per il facile pompaggio non è importante il tenore in cemento, bensì il volume totale della pasta legante (almeno 250 l/mc), dato dal cemento stesso, unito ai finissimi reattivi o aggregati e all'acqua;
- ✚ per finissimi apportati dagli aggregati, si intende la frazione passante sotto 0,125 mm e l'esperienza pratica dimostra che questa frazione granulometrica è decisiva;
- ✚ la sabbia utile per il calcestruzzo pompato deve avere un passante sotto 0,125 mm pari ad almeno il 3%;

- ✚ non cercare di rimpiazzare la carenza di finissimo aumentando il contenuto di sabbia, bensì con aggiunta di cenere volante, fumo di silice o meglio di additivo coesivizzante;
- ✚ usare classi di sabbie separate, per ottimizzare la granulometria del misto (non usare sabbie premiscelate);
- ✚ ridurre la frazione granulometrica tra 4 e 8 mm, a favore di quella inferiore a 0,4 mm e di quella superiore a 8 mm;
- ✚ produrre un calcestruzzo di consistenza soffice e coesivo, additivato con i corretti prodotti, con classe di consistenza S4 e quindi con fattore di riempimento dei cilindri, per ogni mandata, vicino a 100%. L'aspetto relativo al riempimento dei cilindri, normalmente poco considerato dal produttore di calcestruzzo, si traduce in un'elevata resa della pompa che, a parità di frequenza (mandate al minuto) riesce a trasportare un maggiore volume di calcestruzzo, spesso vicino alla capacità teorica del mezzo, che è data dal numero di pompate al minuto, moltiplicato per il volume dei cilindri;
- ✚ usare additivi superfluidificanti definiti PCE, a base di policarbossilati modificati (Figura 79), a prolungato mantenimento della fluidità anche con alte temperature ambiente, ma senza effetto ritardante sui tempi tra l'inizio e la fine della presa del cemento, al fine di evitare le dannose azioni di ritempra del calcestruzzo.

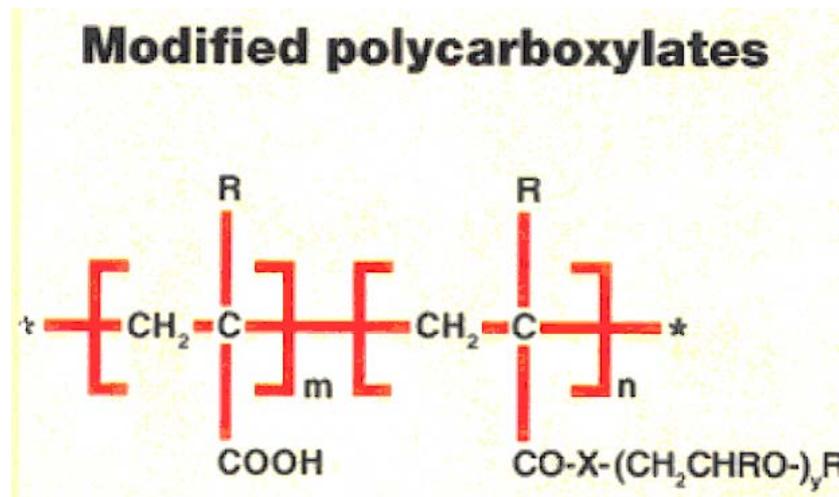


Figura 79 – Struttura chimica di un PCE a base di policarbossilati modificati.

La compattazione del calcestruzzo per effetto della vibrazione meccanica

Nell'interessante introduzione di un suo volume [1], l'Ing. Nebuloni dice: “La somministrazione diretta di energia meccanica per assestare e consolidare il calcestruzzo fresco, favorendone da un lato la sistemazione nella forma e dall'altro un buon costipamento, tale da garantire il raggiungimento di valori elevati di resistenza finale, costituisce senza dubbio il più naturale processo di produzione di elementi o di manufatti di conglomerato di cemento [...]”. In linea teorica, è possibile concordare con quanto riporta un tecnico di grande esperienza, mentre è incerto l'effettivo livello di conoscenza di questa tecnologia, in particolare nel cantiere di costruzione. D'altra parte si giunge ad una conclusione analoga se si interpretano correttamente le risultanze di una indagine che riporta le seguenti parole: “Una elevata percentuale di tecnici della progettazione e produzione del calcestruzzo è convinta che la qualità intrinseca del conglomerato cementizio, sia pure esso ben progettato e confezionato, è vanificata dalle carenze durante la sua messa in opera, in particolare per la sua non corretta compattazione”.

Molto generiche, su questo argomento, sono le prescrizioni delle leggi e delle Norme Tecniche. Infatti il d.m. 9 gennaio 1996 non ne fa cenno, mentre l'Eurocodice 2 si limita, nel cap. 4.1.4. “Materiali”, a rimandare alla norma europea EN 206, a sua volta piuttosto vaga, prescrivendo che:

- ✚ per assicurare una corretta compattazione del calcestruzzo gettato in opera, si raccomanda che la consistenza del calcestruzzo al momento della posa sia uguale alla classe di abbassamento al cono di Abrams S3;

- ✚ la miscelazione, la posa e la compattazione del calcestruzzo fresco siano tali che i componenti del calcestruzzo vengano distribuiti uniformemente nell'impasto;
- ✚ il calcestruzzo deve essere accuratamente compattato durante la posa.

È evidente che la scelta del tipo di vibrazione è spesso molto difficile, in quanto deve tener conto di molti fattori:

- ✚ le caratteristiche del calcestruzzo;
- ✚ la dimensione, natura e rigidità delle casseforme;
- ✚ il modo di produzione della vibrazione;
- ✚ le caratteristiche della vibrazione trasmessa al calcestruzzo (frequenza e accelerazione);
- ✚ i ritmi di produzione.

In linea di principio la scelta del metodo e delle caratteristiche della vibrazione devono essere fatte allo scopo di ottenere l'assestamento migliore, cioè quello che dà il compromesso migliore tra velocità di assestamento, compattezza e resistenza alla sformatura rapida.

Quando i costruttori iniziarono a utilizzare il calcestruzzo, il rapporto acqua:cemento fu tenuto così basso che le miscele avevano una consistenza molto rigida ed esse venivano collocate in strati sottili, costipati con pesanti pestelli a mano, quindi con un'operazione molto difficile e dispendiosa.

L'avvento dell'armatura portò alla realizzazione di strutture più snelle e alla necessità di utilizzare calcestruzzi a consistenza più liquida, molto più facili da mettere in opera e da compattare ma, in carenza di tecnologia, soggetti a segregarsi, meno resistenti e durevoli.

È, o dovrebbe essere ormai a tutti noto, nella teoria se non nella pratica, che il rapporto a/c è decisivo agli effetti della resistenza meccanica e della durabilità del calcestruzzo e tuttavia, questa fondamentale correlazione si applica solo alla condizione che il calcestruzzo sia consolidato in una massa omogenea e contenga la corretta quantità di aria inglobata. Se vengono utilizzate miscele molto rigide, quindi con ridotta lavorabilità, la compattazione con i metodi usuali può essere insufficiente, con conseguente formazione di vuoti macroscopici nella massa e con un eccessivo tenore di aria.

È naturale che la resistenza meccanica del calcestruzzo subisca l'influenza di questi vuoti, in particolare del tenore di aria, tanto che F  ret, nel 1896, forn   la seguente espressione per la resistenza σ del conglomerato indurito:

$$\sigma = \frac{k}{\left(\frac{C}{C + A + W}\right)^2}, \quad (1.11)$$

dove:

- ✚ K    la costante del materiale;
- ✚ C    il volume di cemento per unit   di calcestruzzo;
- ✚ A    il volume di aria per unit   di calcestruzzo;
- ✚ W    il volume di acqua per unit   di calcestruzzo.

Con questa equazione, la resistenza diventa una funzione del rapporto tra acqua pi   aria e cemento e questo    stato confermato dalle successive indagini. Le sperimentazioni di Dutron, mostrano la relazione tra resistenza e rapporto a/c, con l'utilizzo di vari metodi di compattazione: a mano (in tre strati con 80 colpi di pestello cadauno), con vibrazione per immersione e con tavola vibrante.

Se si lavora con molta acqua, bastano anche compattazioni leggere per consolidare il calcestruzzo in una massa omogenea; riducendone invece il quantitativo, il calcestruzzo diventa pi   rigido e meno lavorabile, sino a che la consistenza diventa talmente asciutta per cui, con il consolidamento manuale, non si pu   ottenere una massa omogenea e si determinano numerosi vuoti d'aria: di conseguenza, pi   il calcestruzzo    rigido tanto maggiore deve essere la intensit   della vibrazione (Figura 80).

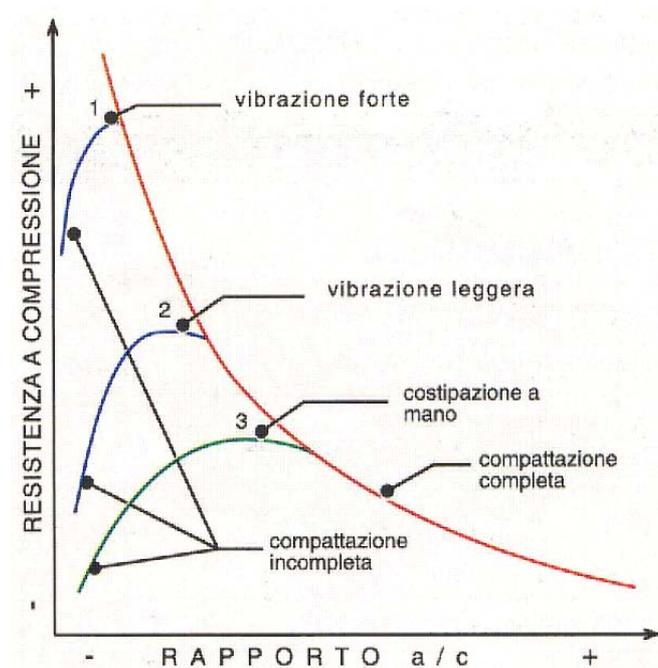


Figura 80 – Effetto della compattazione sulla resistenza, secondo Dutron.

La funzione essenziale della vibrazione, come già anticipato, è quella di compattare il calcestruzzo nelle forme ma si può affermare che la sua meccanica non sia ancora del tutto chiarita, pur basandosi su ovvi fenomeni fisici, che possono essere descritti in modo comprensibile se si parte da una prova molto semplice. Per far scivolare un blocco di pietra su un piano inclinato occorre:

- ✚ spingerlo con uno sforzo F ;
- ✚ aumentare la pendenza, in modo che l'angolo formato dal piano con l'orizzonte sia superiore all'angolo di attrito della pietra stessa con il piano.

Se invece si fa vibrare il piano, il blocco di pietra scivolerà da solo senza necessità di spinta, anche con l'angolo di inclinazione iniziale. Questo miglioramento deriva dal fatto che, per effetto della vibrazione, il blocco viene lanciato verso l'alto e per brevi intervalli di tempo non è più a contatto con il piano di appoggio, quindi per effetto della gravità scende lungo la linea di pendenza con una serie di piccoli salti (Figura 81). Ovviamente, a parità di angolo d'inclinazione, con un determinato sforzo F il movimento del blocco sarà tanto più facile quanto più il blocco sarà leggero, mentre quelli più pesanti tenderanno a restare fermi.



Figura 81 – Fondamentali della vibrazione (da Aux Pieds du Mur di L'Hermite).

Si misuri, utilizzando la stessa vibrazione, lo sforzo F che bisogna esercitare per far scivolare i vari cubi su un piano orizzontale e si chiami P la pressione che i cubi stessi esercitano sul piano di appoggio (Pressione $P = \text{Peso}/\text{Superficie}$). Si vedrà che questa forza è praticamente nulla per basse pressioni mentre, a partire da un dato valore P , aumenta come se l'attrito si producesse sotto la pressione $P - P_0$. Ne risulta che tutto questo avviene come se il cubo fosse effettivamente sollevato da una forza corrispondente alla pressione P_0 .

L'effetto del vibratore equivale a un sollevamento verso l'alto e a una diminuzione dell'adesione con la superficie; questa forza di sollevamento viene definita "espansione", poichè tende a separare le superfici di contatto tra il blocco e il piano; per permettere lo scorrimento senza attrito bisogna ovviamente applicare una vibrazione, tale da provocare una "espansione" superiore alla "pressione".

La vibrazione produce effetti analoghi nel calcestruzzo, in quanto i granuli della miscela vibrano urtandosi gli uni con gli altri (pressione P), riducendo o annullando l'attrito interno determinato dalle loro numerose superfici di contatto. Questa pressione, dovuta agli urti e ai rimbalzi, rappresenta l'espansione, che agisce contemporaneamente in tutte le direzioni.

Si può quindi facilmente intuire che assoggettare l'impasto ad opportuni movimenti vibratorii provoca, nella massa, diversi effetti tra loro interdipendenti, i più appariscenti dei quali sono:

- ✚ l'assestamento, che consiste nell'avvicinamento dei granuli che costituiscono l'impasto;
- ✚ l'aggregazione, un fenomeno fisico che favorisce l'idratazione dei granuli di cemento ed è direttamente collegata all'espulsione dell'acqua in eccesso, con definitiva riduzione del rapporto a/c iniziale.

Assestamento e aggregazione si sviluppano parallelamente durante la vibrazione, però si può dire con certezza che in un primo periodo è prevalente il fenomeno dell'assestamento, mentre l'aggregazione è più rilevante nella fase successiva, quando il calcestruzzo ha già totalmente riempito il cassero.

Compattare il calcestruzzo, significa utilizzare speciali attrezzature per trasmettere vibrazioni ad alta frequenza nella massa del conglomerato fresco, permettendo alla gravità di dar luogo ad un suo riassetto e compattamento. La frequenza impiegata varierà in funzione del tipo di vibratore e del metodo di applicazione, ma normalmente oscilla tra le 3.000 e le 18.000 vibrazioni al minuto (da 50 a 300 cicli/s) e il loro effetto fisico pone il calcestruzzo stesso in una condizione detta "mobile". In poche parole, l'attrito statico che agisce tra le particelle della miscela in riposo (attrito interno), è eliminato non appena le particelle stesse sono messe in moto dalle vibrazioni e pertanto il calcestruzzo assume temporaneamente caratteristiche simili a quelle di un liquido; la forza di gravità causa allora il riassetto e la compattazione del conglomerato cementizio, in quanto le particelle singole cercano di assumere posizioni più vicine possibile le une alle altre e la massa scorrevole avvolge più omogeneamente le armature, penetrando completamente anche le sezioni più sottili della cassaforma. Al cessare della vibrazione le particelle, precedentemente eccitate, si "incastrano" le une con le altre e in questo modo il calcestruzzo raggiunge il più alto grado di solidità, anche in brevissimo tempo.

La frequenza di vibrazione, che è il numero di vibrazioni al minuto, gioca ovviamente un ruolo molto importante, in quanto ogni granulo di aggregato oscilla nella pasta cementizia che lo circonda, come un pendolo sincronizzato su una determinata frequenza, per cui si dice che ciascuno ha "una propria frequenza di vibrazione". I granuli grossi si muovono lentamente e quindi hanno una frequenza molto bassa, che aumenta con il decrescere del loro diametro e della massa. Ne risulta che le basse frequenze, sino a 2.500 V_{IB}/min (50 cicli/s), mettono in movimento gli aggregati grossi, quelle intermedie tra 3.000 V_{IB}/min e 6.000 V_{IB}/min (60 ÷ 120 cicli/s) gli aggregati medi e quelle elevate e molto elevate, superiori a 12.000 V_{IB}/min (240 cicli/s) agiscono invece sulla malta cementizia. Per conseguenza, la vibrazione a bassa frequenza necessita di elevata energia, in quanto deve movimentare gli aggregati più grossi, di massa maggiore, mentre quella ad alta frequenza mette in movimento la malta (gli aggregati fini e il cemento), che ha una massa minore. La malta cementizia entra in condizione "mobile" e agisce come lubrificante tra gli aggregati grossi venendo inoltre più compattata; in conclusione, si dovrebbero preferibilmente utilizzare vibratorii ad alta frequenza, il cui risultato è tecnicamente ed economicamente più elevato.

La conoscenza della sola frequenza non è, naturalmente, sufficiente per determinare l'effetto che ci si può attendere, in quanto lo stesso dipende anche dalla sua accelerazione che è normalmente fornita come misura dell'intensità della vibrazione ed è una funzione della:

$(\text{frequenza})^2 \times (\text{ampiezza})$, espressa in "g" (accelerazione di gravità). (2.11)

Poiché il peso delle particelle, quindi la loro gravità, causa le pressioni, che a loro volta creano gli attriti, l'accelerazione della vibrazione, fissata in relazione con l'accelerazione della gravità, può fornire un'utile indicazione dell'effetto del metodo di compattazione meccanica adottato.

Per una data consistenza del calcestruzzo, perchè lo stesso sia compattato e si produca un soddisfacente guadagno di resistenza, si deve raggiungere un "X" minimo di accelerazione e il minimo valore richiesto per questa componente, dipende dalla consistenza stessa del calcestruzzo e dalla dimensione della forma. Un conglomerato cementizio a consistenza S1 richiede circa 4 g, che si riducono a 1 g per la S3; aumentando la vibrazione, l'accelerazione rende quindi più veloce il processo di compattazione e l'ampiezza deve comunque essere al di sopra di un certo valore minimo, valutato in circa 0,05 mm.

La vibrazione per immersione è il metodo più comunemente utilizzato (Figura 82), salvo che nel campo della prefabbricazione, in quanto il contatto diretto tra il tubo vibrante e il calcestruzzo consente una compattazione veloce ed efficace, anche con sezioni sottili e armatura densa; il diametro del tubo deve essere scelto sulla base della dimensione minima della struttura e della luce libera tra le barre di armatura (Tabella 47).

Applicazioni	Diametro tubo (mm)
Sezioni molto sottili ed alta densità di armatura	25
Sezioni sottili ed armatura densa	35 ÷ 50
Muri normali, lastre di pavimentazioni, ecc.	50 ÷ 75
Strutture di grande spessore con cls massivi	100 ÷ 150

Tabella 47 – Diametro del tubo vibrante in funzione delle modalità di applicazione.

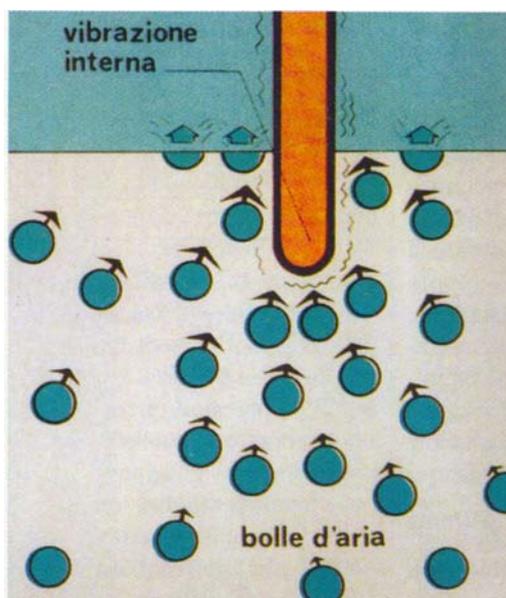


Figura 82 – La vibrazione meccanica per immersione.

L'operazione di compattazione del calcestruzzo per vibrazione meccanica, dovrebbe essere correttamente progettata e programmata già prima della sua messa in opera; questo significa, per esempio, che il calcestruzzo deve essere approvvigionato ad un ritmo tale che sia compatibile con i tempi dell'operazione e che siano realizzati strati orizzontali non troppo spessi. A tale proposito il Capitolato delle Ferrovie dello Stato prescrive che:

- ✚ il conglomerato cementizio deve cadere verticalmente ed essere steso in strati orizzontali di spessore limitato e comunque non superiore a 50 cm misurato dopo la vibrazione;

- ✚ il calcestruzzo deve essere compattato con un numero di vibratorii adeguato, che è determinato, prima di ogni operazione di getto, in relazione alla classe di consistenza del calcestruzzo adottata e alle caratteristiche dei vibratorii;
- ✚ durante la compattazione di uno strato, i vibratorii ad immersione devono penetrare nello strato inferiore per omogeneizzare adeguatamente la massa.

In altre parole, lo spessore di ogni singolo strato di calcestruzzo non dovrebbe superare la lunghezza dell'ago del vibratore interno, quindi normalmente compreso tra 300 e 600 mm. Il tubo vibrante deve essere tenuto verticale e deve penetrare sufficientemente nello strato precedentemente compattato, per almeno 150 mm, poiché ciò assicura un buon legame tra gli strati stessi.

Il tempo di compattazione dipende soprattutto dalla consistenza del calcestruzzo, dalla potenza del vibratore e dallo spessore dello strato; l'operatore qualificato può determinare il successo dell'operazione e si deve basare, per la sua valutazione, su alcuni indizi essenziali, quali:

- ✚ la regolarizzazione del suono emesso dal vibratore, la riduzione dell'affioramento di bolle d'aria, l'aspetto della superficie del calcestruzzo, che deve essere lucida e ricoperta di un sottile strato di malta.

Non appena queste premesse siano state soddisfatte (per calcestruzzi plastici e semifluidi in circa 10 ÷ 15 secondi), il vibratore deve essere estratto lentamente, così da permettere che il calcestruzzo fresco riempi il buco lasciato dal tubo.

Considerando che la potenza del vibratore aumenta con il diametro dell'ago vibrante, dato che un diametro maggiore significa normalmente maggiore massa eccentrica, che a sua volta comporta una maggiore ampiezza, e che la capacità di vibrazione decresce rapidamente con l'aumento della distanza dall'ago vibrante stesso, se ne deve preventivamente determinare il campo d'azione, cioè il cosiddetto "raggio d'azione utile", che è la metà del diametro del settore cilindrico compattato dal tubo immerso; come regola generale per un calcestruzzo ordinario, si assume che il diametro d'azione di un vibratore sia pari a circa 8 - 10 volte il diametro dell'ago vibrante (Figura 83).

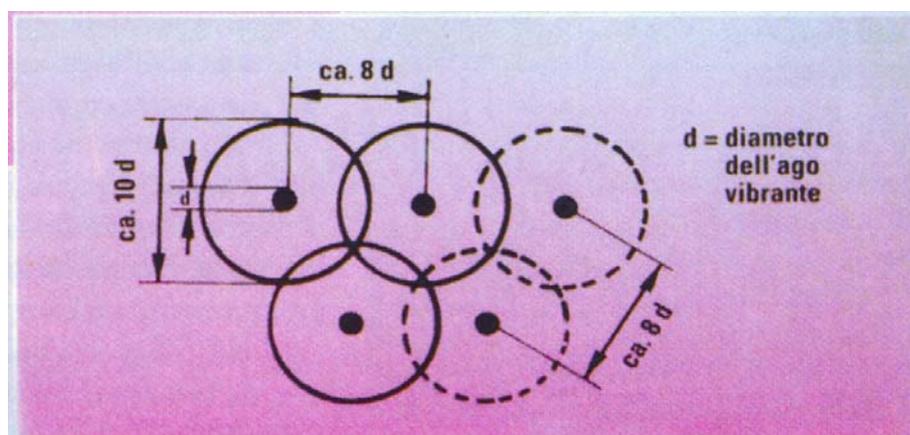


Figura 83 – Campo d'azione del vibratore.

Nel descrivere il processo di vibrazione si riassumono, qui di seguito, alcuni consigli pratici per la buona riuscita di questa fondamentale fase della messa in opera del calcestruzzo:

- ✚ valutare se il vibratore scelto rappresenta il corretto metodo di compattazione;
- ✚ istruire a sufficienza gli operatori;
- ✚ determinare il diametro del tubo vibrante in relazione alla distanza tra i ferri d'armatura;
- ✚ scegliere il vibratore, tale che la sua lunghezza non superi lo spessore dello strato di calcestruzzo posato;
- ✚ non posare e compattare strati superiori a 600 mm;
- ✚ scegliere la distanza tra i punti di immersione del vibratore, tale che i campi d'azione si intersechino;
- ✚ far penetrare il vibratore verticalmente e velocemente, sino a una profondità di circa 150 mm nello strato sottostante;

- ✚ estrarre il vibratore, lentamente, quando la superficie del calcestruzzo è lucida e non si osservi più la formazione di grosse bolle d'aria;
- ✚ evitare il contatto tra il vibratore e i ferri d'armatura o il cassero;
- ✚ non muovere orizzontalmente il vibratore;
- ✚ iniziare la compattazione in prossimità del fronte di getto fresco;
- ✚ nel caso di casserature inclinate, iniziare la compattazione in prossimità del punto più profondo;
- ✚ non trasportare o distribuire il calcestruzzo fresco con il vibratore;
- ✚ immergere sempre completamente l'ago vibrante nel calcestruzzo, per evitarne il surriscaldamento.

Un calcestruzzo ben studiato e di adeguata consistenza è meno sensibile alle conseguenze di una vibrazione eccessiva, che possono essere:

- ✚ segregazione;
- ✚ affioramento di sabbia in superficie (nei calcestruzzi magri);
- ✚ eccessiva perdita di aria nei calcestruzzi additivati con specifici aeranti.

Si deve comunque rilevare, che è più frequente il problema di una vibrazione insufficiente, con danni in questo caso più evidenti e rilevanti, sia agli effetti della resistenza che della durabilità.

La scelta dell'adeguata consistenza è tanto più importante quanto più è deficitaria l'organizzazione del cantiere e la carenza di mezzi di compattazione adeguati, problema ben presente a chi quotidianamente deve effettuare i controlli del getto. La Società Autostrade si cautela prescrivendo, salvo diverse disposizioni, che: "[...] il rapporto a/c non dovrà superare il valore di 0,50 [...] la lavorabilità dovrà essere tale da dare uno slump al cono di Abrams compresa tra 160 e 180 mm (classe S4) [...]".

In conclusione, è realmente importante che tutti prendano coscienza delle carenze normative, prescrizionali e culturali, che portano ad una improvvisazione della scelta del metodo di compattazione del calcestruzzo con vibrazione meccanica, con conseguente decadimento, spesso grave, delle sue caratteristiche prestazionali, benché la miscela fosse stata ben caratterizzata dal Prescrittore e correttamente progettata e confezionata dal Produttore.

La stagionatura protetta

Particolarmente importante, oltre all'operazione di compattazione, è la cura della stagionatura del calcestruzzo, cioè l'insieme di precauzioni che, durante il processo di indurimento, consentono di trasformare l'impasto fresco in un materiale resistente, con limitate fessure e quindi durevole.

Netta è la percezione che il calcestruzzo abbia potenzialità che spesso vengono penalizzate da una manipolazione inadeguata e da una scarsa sensibilità circa i danni provocati dalla inosservanza di una semplice operazione di prevenzione, "la stagionatura protetta utile del calcestruzzo allo stato fresco e nel primo indurimento", per il tempo effettivamente necessario.

La mancanza di qualità danneggia l'immagine delle Committenze e delle Imprese e ne evidenzia le oggettive responsabilità; il tema della stagionatura è, invece e purtroppo, spesso trascurato anche nei Capitolati più articolati e non viene usualmente verificato dal Direttore dei Lavori. Stagionare vuole dire aspettare, in contrasto con la prassi comune in quasi tutti i cantieri, che pone invece quale aspetto preponderante l'accelerazione della produzione per ovvi motivi economici.

Raramente si considera, al contrario, che un adeguato periodo di stagionatura protetta, iniziato immediatamente dopo aver concluso le operazioni di posa in opera, consentirà al calcestruzzo di raggiungere le proprie prestazioni, sia nella massa che, in particolare, nello strato superficiale.

La stagionatura soffre intrinsecamente di una certa indeterminatezza, dato che non trova riscontro in grandezze fisiche facilmente prescrivibili e controllabili ma, per contro, gli effetti negativi che derivano da una sua non corretta applicazione, sia per quanto riguarda le metodologie, che la durata, sono facilmente rilevabili: corrosione dei ferri d'armatura (Figura 84), fessurazione (Figura 85), aggressione da parte dell'ambiente, resistenza meccanica ridotta.

Il tema della stagionatura protetta, solo accennato nella UNI EN 206-1, è invece particolarmente approfondito nelle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale, pubblicate a cura del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici; lo stesso tema, importante per l'Applicatore di pavimentazioni industriali, viene menzionato anche nel Capitolo 12 del Codice di Buona Pratica pubblicato da Conpaviper.- Associazione Nazionale Pavimentazioni Continue.



Figura 84 – Corrosione dei ferri d'armatura.

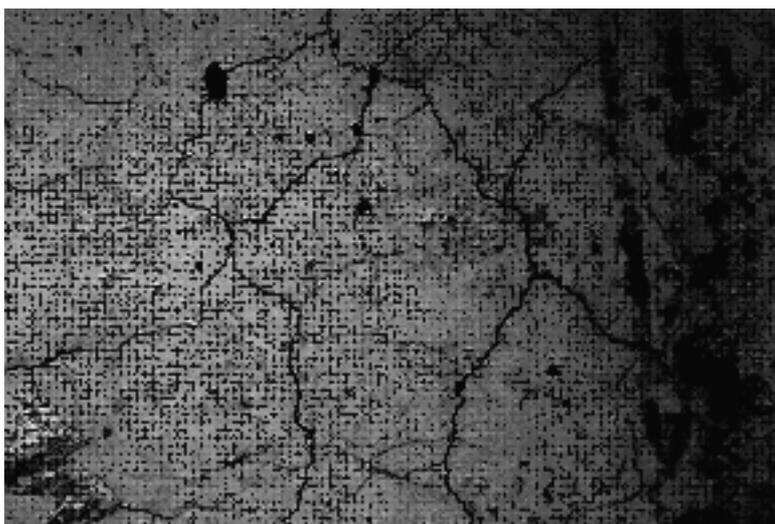


Figura 85 – Fessurazione del calcestruzzo.

La protezione consiste nell'impedire, durante la fase iniziale del processo di indurimento, l'essiccazione della superficie del calcestruzzo, in primo luogo perchè l'acqua è indispensabile per l'idratazione del cemento e per il progredire delle reazioni pozzolaniche, in secondo luogo per evitare che lo strato superficiale del manufatto risulti poroso e quindi fortemente permeabile e di conseguenza scarsamente resistente alla penetrazione delle sostanze aggressive. La ridotta qualità dello strato corticale è, nel caso delle pavimentazioni industriali, ancora più nociva per la sua resistenza diretta all'abrasione e per l'applicazione di indurenti minerali superficiali, sotto forma di spolveri o di pastine, per riporti cementizi o resinosi. Sostanzialmente, la stagionatura protetta consiste nell'attuare una serie di procedure che permettano di far raggiungere, al conglomerato cementizio, un'adeguata idratazione mediante un idoneo controllo dell'umidità, sin tanto che lo spazio tra le particelle di cemento, inizialmente riempito d'acqua, sia intasato dai prodotti derivanti dall'idratazione stessa; nella prassi di cantiere, le operazioni mirate a mantenere l'impasto saturo di acqua sono invece generalmente protratte per tempi inferiori a quelli necessari ad ottenere la completa idratazione del legante.

Per una corretta valutazione dell'importanza della cura del calcestruzzo dopo il getto, si deve considerare che la sua risposta al processo di stagionatura dipende:

- ✚ dalla sua composizione, quindi dal rapporto a/c, dal tipo e classe del cemento, tipo e qualità delle aggiunte; un calcestruzzo con ridotto rapporto a/c, a parità di tipo e classe di cemento, richiede infatti un minor tempo di maturazione protetta, rispetto al corrispondente con più acqua, sia per la più rapida interruzione del reticolo capillare, sia in quanto raggiunge più velocemente la resistenza e la tessitura microcristallina superficiale che assicura un ridotto grado di permeabilità. A parità d'acqua, il tempo di stagionatura protetta utile è inferiore con un cemento a rapido indurimento, rispetto a quello con un cemento che si idrata più lentamente o con un elevato contenuto di aggiunte di natura pozzolanica;
- ✚ dalla sua temperatura, che aumenta a causa delle reazioni esotermiche tra il cemento e l'acqua;
- ✚ dalle condizioni ambientali, durante e dopo la stagionatura; per cui una bassa umidità relativa, l'insolazione e l'alta ventosità, accelerano l'essiccazione del calcestruzzo non adeguatamente protetto nelle prime fasi di idratazione del cemento.

Evidentemente, non tutto lo spessore del getto di calcestruzzo è influenzato dalle condizioni di stagionatura, ma solamente lo strato corticale avente uno spessore tra 20 e 50 mm, ininfluenza dal punto di vista strutturale ma determinante per quanto riguarda la durabilità delle opere in calcestruzzo armato (in questo caso viene definito copriferro e ha lo scopo di preservare i ferri d'armatura dalla corrosione) o non armato. Lo strato corticale è, inoltre, a contatto con l'ambiente esterno più o meno aggressivo ed è quindi necessario porre particolare attenzione alla sua qualità, che risulta normalmente più debole di quella della massa, essendo più ricco di malta cementizia e quindi di aggregato fine e con un rapporto a/c locale più elevato.

L'aspetto più rilevante della maturazione protetta consiste, pertanto, nell'attuare tutte le precauzioni per ridurre il rischio di evaporazione accelerata dell'acqua d'impasto, i cui fattori determinanti sono la velocità del vento e la differenza Δp tra la pressione parziale del vapore sullo strato d'acqua, sulla superficie del calcestruzzo, e la pressione parziale nell'aria ambiente.

Dalla lettura dei diagrammi riportati qui di seguito (Figura 86), si può esemplificare un caso nel quale le temperature dell'acqua e del calcestruzzo siano di 27°C e l'umidità relativa (U.R.) sullo strato d'acqua sia del 100%; se la temperatura dell'aria fosse di 25°C, con U.R. del 70%, la differenza Δp risulterebbe uguale a $(27 - 16,5) = 10,5$ mm; assumendo una velocità del vento di 2 m/sec., dal secondo diagramma di Figura 86 si ricava una velocità di evaporazione dell'acqua di 0,39 kg/m²h.

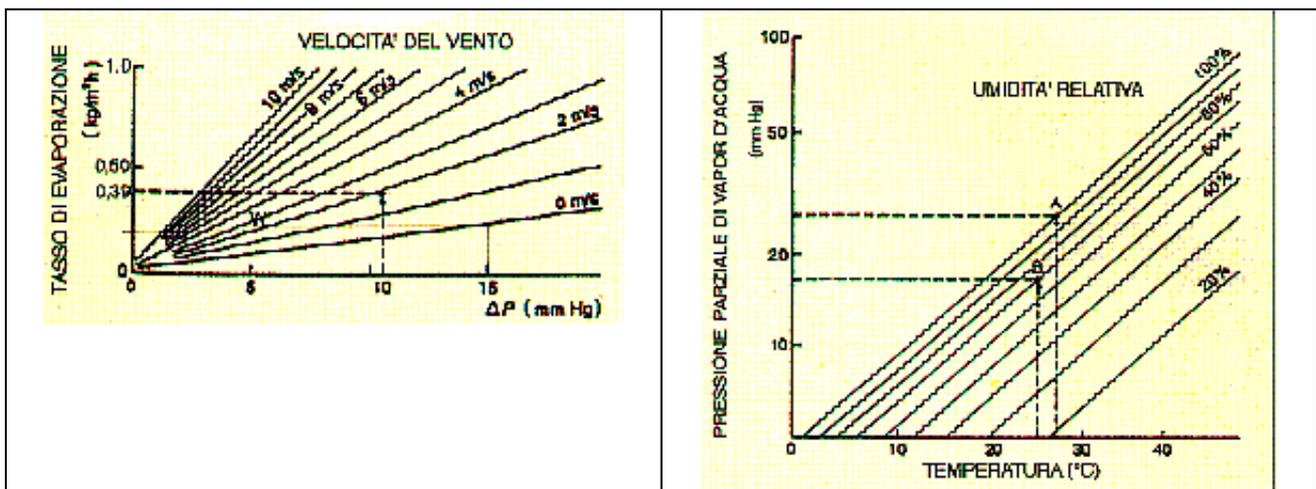


Figura 86 – Calcolo di Δp in rapporto alla temperatura del calcestruzzo, umidità relativa e velocità del vento.

Anche se la velocità di evaporazione dell'acqua dalle superfici di calcestruzzo, nelle fasi iniziali dell'indurimento, dipende essenzialmente dal tipo di calcestruzzo e dalla sua tendenza a essiccare, le norme ACI (American Concrete Institute) raccomandano, per un calcestruzzo legato

con CEM I, speciali precauzioni se la velocità di evaporazione è vicina a 1 kg/m²h, mentre nel caso dei cementi di miscela, tale soglia è molto più bassa in quanto caratterizzati da minore essudazione. Per rendere più concreto il significato delle grandezze riportate più sopra, si ricorda che una perdita di acqua di 0,1 kg/m²h, che interessi uno strato corticale dello spessore di 30 mm, corrisponde a circa il 20% del suo contenuto d'acqua iniziale.

Le Guide Tecniche ed i Codici, forniscono chiare, anche se schematiche, indicazioni circa il tempo di stagionatura protetta espresso in giorni, per strutture in ambiente secco o umido, senza insolazione o con insolazione diretta, media o intensa o con vento di media o forte velocità.

Le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale forniscono un'utile distinzione tra le classi climatiche (Tabella 48) e suggeriscono che la stagionatura protetta debba essere prolungata finché l'idratazione non raggiunga un grado tale da assicurare determinate resistenze relative (Tabella 49), definite come porzioni di resistenza, date dal rapporto tra la resistenza media del calcestruzzo alla fine del periodo di stagionatura e la resistenza media a 28 gg del calcestruzzo confezionato, stagionato e provato in accordo con EN ISO 2735/2 e EN ISO 4102/1.

Classi climatiche	Definizione	Umidità relativa media
U	umida	> 80%
M	moderata	tra 65 e 80%
S	secca	tra 45 e 65%
SS	molto secca	< 45%

Tabella 48 – Le classi climatiche secondo le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Classi climatiche	Proporzioni di resistenza
U	0,10
M	0,40
S	0,50
SS	0,60

Tabella 49 - Porzioni di resistenza utile in funzione delle classi climatiche, secondo le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Dell'effetto delle condizioni climatiche sul tipo e durata della maturazione protetta, si deve tenere in particolare conto nel getto di strutture con elevata superficie esposta, quali pavimentazioni e solette, nelle quali la perdita incontrollata di acqua conduce, oltre che al decadimento delle proprietà del calcestruzzo, anche a inevitabili fessurazioni o ad una accentuazione del possibile rischio di imbarcamento delle lastre sottili (curling). Questa patologia è conseguenza dell'elevato rapporto tra le superfici esposte all'aria e la sezione del getto; la superficie superiore è sottoposta ad una rapida evaporazione, mentre quella inferiore, che è a contatto con il sottofondo, è meno interessata dal fenomeno. Le diverse tensioni che si vanno ad generare (differenziale di ritiro) portano tendenzialmente ad un maggiore imbarcamento; accorgimento importante, oltre alla corretta stagionatura protetta, è l'applicazione preventiva di un letto di sabbia, con effetto drenante. La presa e quindi l'indurimento della pasta cementizia, dipendono dalla continua presenza d'acqua e tali reazioni comportano la sottrazione di una determinata percentuale di liquido, per cui è necessario fare in modo che quest'acqua resti disponibile, o comunque possa rapidamente essere ripristinata, in quanto il processo di idratazione può progredire significativamente solo quando la tensione del vapore nei pori della pasta cementizia è prossima al valore di saturazione (U.R. >90%). Nel grafico di Figura 87 è evidenziato il ridotto sviluppo di resistenza di provini di

calcestruzzo conservati in ambiente secco o con moderata umidità relativa (50 e 75%) rispetto a quello di provini mantenuti in ambiente umido (U.R. >95%).

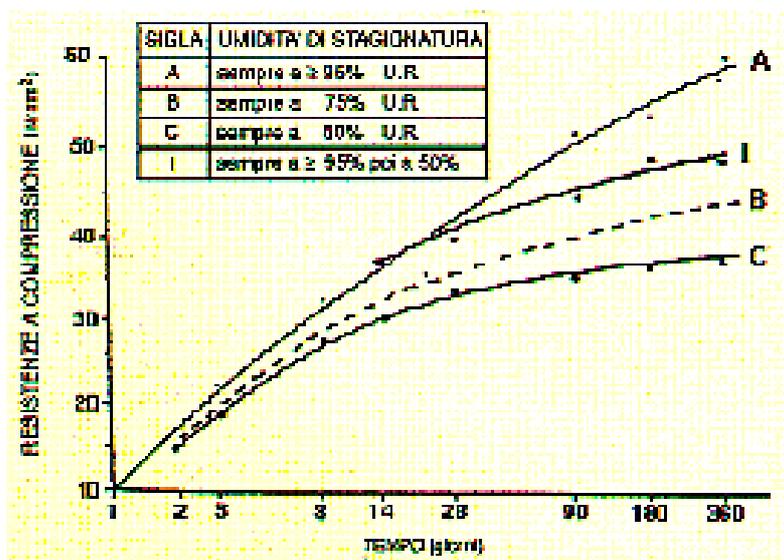


Figura 87 - Sviluppo delle resistenze in funzione dell'umidità dell'ambiente di maturazione e della sua durata, secondo le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

È importante rilevare, che anche i provini lasciati idratare per i primi giorni in ambiente umido (curva I del grafico di Figura 87), risentono di una successiva conservazione in ambiente a ridotta umidità relativa, presentando uno sviluppo della resistenza più limitato rispetto a quello dei provini conservati sempre in ambiente umido.

Agli effetti della vita di servizio di una struttura, occorre distinguere tra durabilità potenziale del calcestruzzo, inteso come materiale da utilizzare in una specifica condizione ambientale e durata effettiva del calcestruzzo in opera, che è la conseguenza dell'incompatibilità tra qualità locali del calcestruzzo e condizioni locali di esposizione, quindi di difetti non generalizzati. È evidente che la vita di servizio del calcestruzzo, come materiale associato in una struttura, potrà essere effettivamente raggiunta solo qualora, a posa in opera avvenuta, la sua qualità non sia stata in qualche modo compromessa da difetti di compattazione e da un'inadeguata stagionatura protetta. L'interruzione anticipata della stagionatura protetta ha, come conseguenza, pesanti effetti negativi sulla permeabilità, in quanto causa una diminuzione del grado di idratazione del legante, tanto che, alle temperature ordinarie, la velocità di idratazione del cemento diminuisce fino a valori trascurabili se l'umidità relativa interna dell'impasto scende al di sotto dell'80%.

Quando la stagionatura protetta viene interrotta e l'acqua che non ha ancora reagito è allontanata, la porosità determinata dalla formazione di capillari risulterà molto alta, indipendentemente dal basso rapporto acqua/cemento utilizzato e la permeabilità dello strato corticale sarà maggiore, quindi ridotta o nulla la sua capacità di rallentare la penetrazione nella massa degli aggressivi esterni.

Si è già ricordato che le norme e i codici forniscono i tempi minimi di mantenimento della stagionatura protetta, anche in funzione della velocità di sviluppo delle resistenze del calcestruzzo; in relazione al rapporto R_{28g}/R_{28gg} , la UNI EN 206-1 considera a rapido sviluppo quelli che hanno tale rapporto $\geq 0,5$, medio sviluppo con un rapporto $\geq 0,3$ e $< 0,5$, lento sviluppo con un valore $\geq 0,15$ e $< 0,3$ e molto lento se il rapporto è inferiore a $0,15$ (Tabella 50).

Tipo di calcestruzzo	Rapporto tra resistenze a 2 e 28 gg
Rapido	$\geq 0,5$
Medio	$\geq 0,3$ e $< 0,5$
Lento	$\geq 0,15$ e $< 0,3$
Molto lento	$< 0,15$

Tabella 50 – Classificazione dello sviluppo delle resistenze del calcestruzzo in funzione del rapporto R_{2gg}/R_{28gg} , secondo le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Se si analizzano una serie di valori di resistenze a compressione, a 2 giorni di maturazione in funzione di quelle a 28 giorni, ricavati da prove su calcestruzzi confezionati in laboratorio, dosati in ragione di 350 kg/mc e con rapporto a/c = 0,55, con diversi cementi, sia per classe che per provenienza, l'andamento tendenziale dei valori riportati è rappresentabile con una retta, avente l'equazione [$R_{2gg} = - 8,84 + 0,768 R_{28gg}$], **(3.11)**

con un coefficiente di correlazione pari a 0,91.

Si può affermare, che buona parte dei calcestruzzi confezionati con i normali cementi, si collocano nella fascia dei conglomerati cementizi a sviluppo medio delle resistenze; al di fuori di questa fascia si possono individuare i calcestruzzi di CEM I e II 42,5 R e 52,5 (a rapido sviluppo) e quelli di CEM III e CEM IVB 32,5 (a lento sviluppo).

In sostanza, per raggiungere le potenziali prestazioni attese dal calcestruzzo, soprattutto nella zona corticale, occorre proteggerlo e stagionarlo accuratamente. Questa operazione, che deve iniziare appena possibile dopo la sua compattazione, consiste nell'evitare la sua prematura essiccazione provocata soprattutto dall'irraggiamento solare e dal vento.

Premesso che tipo e modalità da adottare per la stagionatura protetta sono influenzati dal periodo di tempo tra il getto e la rimozione dei casseri, dipendente soprattutto dall'evoluzione della resistenza del calcestruzzo (Tabella 51) e dalla funzione dei casseri stessi, la protezione consiste nel prevenire:

- ✚ il dilavamento del calcestruzzo per pioggia o ruscellamento d'acqua;
- ✚ il suo rapido raffreddamento durante i primi giorni dal getto;
- ✚ l'elevata differenza tra la temperatura nella massa e quella dello strato corticale;
- ✚ la bassa temperatura o il gelo;
- ✚ le vibrazioni e i colpi che possono danneggiare il calcestruzzo ed interferire con l'aderenza tra la pasta di cemento e l'armatura.

I metodi di stagionatura più diffusi consistono nel:

- ✚ lasciare i casseri posizionati per un tempo più prolungato;
- ✚ coprire i getti con teli di plastica;
- ✚ rivestirli con teli umidi;
- ✚ applicare sulle superfici, appena rifinite, prodotti stagionanti che formino membrane protettive (UNI 8866 - UNI 8656 - UNI 8660).

Questi metodi possono essere usati da soli o in combinazione tra di loro e devono essere concordati prima dell'inizio dei lavori in cantiere.

Sviluppo resistenza	a/c	Classe del cemento
Rapido	$< 0,5$	$\geq 42,5$ R
Medio	0,5 – 0,6	42,5 R
Medio	$< 0,5$	32,5 R – 42,5 R
Lento	nn	Negli altri casi

Tabella 51 – Evoluzione della resistenza del calcestruzzo, in funzione di a/c e della classe del cemento.

La durata della stagionatura è legata alla velocità con la quale si raggiunge una certa impermeabilità (resistenza alla penetrazione di gas o liquidi) dello strato corticale del calcestruzzo e pertanto può essere determinata in funzione della maturità, con riferimento al grado di idratazione del cemento e alle condizioni ambientali o in funzione di esigenze locali. Nel caso in cui il calcestruzzo si trovi esposto a più severe condizioni di abrasione o di esposizione, tipiche di una pavimentazione industriale o di un piazzale all'aperto, il periodo di stagionatura protetta deve essere convenientemente prolungato. Quindi, tra le informazioni che l'Utilizzatore può richiedere al Produttore di calcestruzzo, le informazioni sul tipo e sulla classe di cemento utilizzato possono essere utili per stimare lo sviluppo delle resistenze alle brevi stagionature, parametro indispensabile per la determinazione del tempo di stagionatura, secondo quanto indicato in Tabella 51 o mediante la curva dello sviluppo delle resistenze a 20°C, tra 2 e 28 giorni (Tabella 52).

Tipo di cemento	Resistenza a 2 gg. (N/mm ²)
Rapido	≥ 17,5
Medio	≥ 10,5 < 17,5
Lento	≥ 5,3 < 10,5
Molto lento	< 5,3

Tabella 52 - Classificazione dello sviluppo delle resistenze del calcestruzzo in funzione del rapporto R_{2gg}/R_{28gg} , con riferimento ad un calcestruzzo con resistenza media a compressione a 28 giorni pari a 35 N/mm², secondo le Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

In generale, la durata della stagionatura protetta, espressa in giorni di maturazione, corrisponde al tempo necessario ad ottenere una maturazione idonea del calcestruzzo alla temperatura di 20°C. Nel caso di esposizione all'abrasione, tipico delle pavimentazioni industriali e dei piazzali, la superficie deve essere stagionata per almeno 7 giorni, in qualsiasi condizione di sviluppo delle resistenze o fino a che il conglomerato non abbia raggiunto un rapporto R_{2gg}/R_{28gg} pari ad almeno 0,80.

Il tempo di stagionatura protetta del calcestruzzo deve essere stimato in base alla temperatura media dell'aria, assumendo che quella del calcestruzzo sia ad essa uguale, o misurando la temperatura effettiva del conglomerato cementizio ad una profondità di 10 mm e a prefissati intervalli di tempo.

Il capitolato deve contenere le specifiche che consentano di controllare la microfessurazione iniziale del calcestruzzo, la cui temperatura non deve scendere sotto i 0°C sino a quando non abbia raggiunto una resistenza alla compressione di almeno 5 N/mm². In presenza di gelo non possono ovviamente essere adottati metodi di stagionatura che comportino l'impiego di acqua e devono essere protetti dall'ingresso dell'acqua stessa, proveniente dall'esterno, per almeno 7 giorni.

Il metodo di stagionatura protetta da prendere sicuramente in considerazione con più favore è quello che prevede l'impiego di prodotti anti-evaporanti (curing compound), almeno per due ragioni:

- ✚ semplice e immediata applicazione, sulle superfici di calcestruzzo esposte, di un film a spessore costante, in quantità prefissabile anche da una prescrizione di capitolato;
- ✚ possibilità di effettivo controllo dell'impiego di un sistema di stagionatura protetta da parte del Direttore dei Lavori, con prodotti rispondenti a specifiche norme tecniche.

La norma UNI 8656, identifica i curing compound (Figura 88) come "quei prodotti filmogeni che vengono applicati sulla superficie del calcestruzzo per ridurre la perdita di acqua per evaporazione durante il primo periodo di maturazione". Questa norma classifica tre tipi di filmogeni:

- ✚ tipo 1, prodotti trasparenti o semitrasparenti;
- ✚ tipo 2, prodotti trasparenti o semitrasparenti contenenti una sostanza colorante debole;
- ✚ tipo 3, prodotti non trasparenti.

I prodotti filmogeni trasparenti o semitrasparenti devono risultare, una volta applicati, incolore; qualora contenga un colorante debole, esso deve essere facilmente visibile sulla superficie di applicazione per almeno 4 ore e non più visibile dopo 28 giorni di maturazione del calcestruzzo.

Quelli non trasparenti devono formare sulla superficie trattata, quando vengono applicati nella quantità e con le modalità prescritte, una pellicola uniforme, generalmente bianca.



Figura 88 - Applicazione di curing compound.

I curing compound devono aderire al calcestruzzo fresco caratterizzato, in superficie, da una consistenza tale da permetterne l'applicazione; il film deve essere continuo, aderente e non presentare screpolature o fori per almeno 7 giorni. Ulteriori prescrizioni sono:

- ✚ ritenzione d'acqua (determinazione secondo la UNI 8657) tale per cui sia assicurata una perdita di liquido, per evaporazione, inferiore a $0,55 \text{ kg/m}^2$ a 72 ore (perdita media di $0,008 \text{ kg/m}^2\text{h}$), in condizioni di temperatura ($38 \pm 1^\circ\text{C}$) e di umidità relativa dell'ambiente ($32 \pm 2\%$) standardizzate;
- ✚ tempo di essiccamento (determinazione secondo la UNI 8658), al tatto, di non oltre 4 ore dall'applicazione (deve inoltre essere verificato che, dopo 12 ore, il film in opera sia completamente essiccato e, se transitabile, non si stacchi dalla superficie del calcestruzzo né la renda sdruciolevole).

È prescritta anche l'influenza sulle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, mediante prova di abrasione (determinazione secondo la UNI 8660), per cui i provini trattati devono avere un coefficiente di abrasione non maggiore del 15% rispetto a quello dei provini non trattati.

Molto significativa è la nuova proposta di antievvaporanti sigillanti, che rispetto a quelli tradizionali sono caratterizzati dal significativo vantaggio di non impedire successive applicazioni; questa nuova famiglia di curing compound, che risponde anche ai requisiti della norma ASTM C-309, non solo non impedisce l'adesione, ma la migliora come evidenziato nei grafici di seguito (Figura 89 e 90). Altra novità è costituita dai cosiddetti "self curing agents", che la UNI EN 934-2:2007 definisce più correttamente come "additivi ritentori d'acqua" (prospetto 4 della norma), aggiunti direttamente in fase di miscelazione e costituiti da polimeri solubili in acqua: il loro effetto è di trattenere l'acqua contenuta nell'impasto, limitandone l'evaporazione, spesso attraverso la modificazione della microstruttura dei prodotti d'idratazione del cemento e la riduzione della permeabilità del calcestruzzo indurito. L'impiego degli antievvaporanti, ancora oggi, è in generale molto limitata nei nostri cantieri, sia per la diffusa ignoranza circa i problemi derivanti dalla cattiva stagionatura del calcestruzzo, sia per la convinzione che sia più economico provvedere alla bagnatura del getto finito con acqua. Questo non è assolutamente vero, se si considera il costo tempo/uomo impegnato in una corretta applicazione del sistema di bagnatura e la limitata quantità di curing compound da utilizzare, normalmente variabile tra 0,1 e 0,3 kg per mq di superficie.

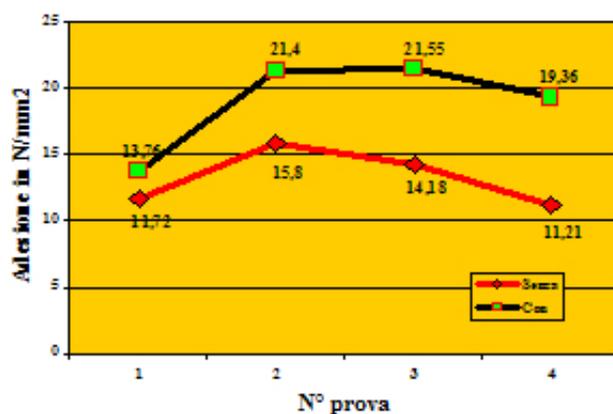


Figura 89 - Adesione di resina epossidica livellante al calcestruzzo, con e senza applicazione di curing-compound sigillante.

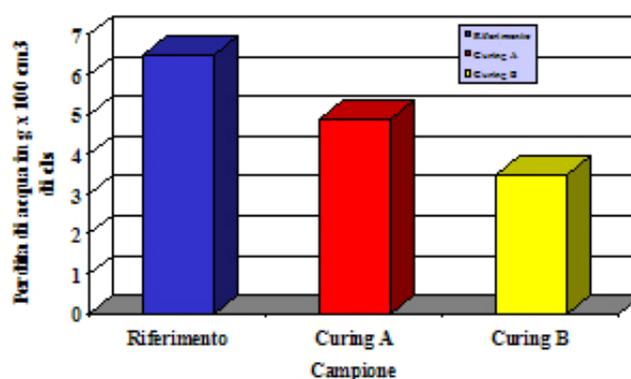


Figura 90 - Valore di perdita di acqua, con e senza curing-compound sigillante, secondo la ASTM C-309.

Riferimenti bibliografici

[1] – Nebuloni , Le vibrazioni meccaniche nella formatura degli elementi prefabbricati, ITEC Editrice, Milano, 1984.

CAPITOLO XII

IL CALCESTRUZZO PROIETTATO

Introduzione all' underground

Una delle principali opzioni per il recupero di spazi vitali e vivibili, potrebbe essere l'utilizzazione del sottosuolo per installazioni industriali, commerciali e sociali. Oggi, costruire in sotterraneo vuole essenzialmente dire realizzare opere per la viabilità e per il trasporto, nonché per l'approvvigionamento idrico ed idraulico. In particolare per quanto riguarda gallerie e tunnel (Figura 91), molto è stato fatto per perfezionare il collegamento tra le fasi di progettazione e di costruzione di un'opera, grazie anche ai sistemi basati sul calcolo numerico che si fondano sulla simulazione dell'interazione struttura-terreno, vedi il metodo N.A.T.M. (New Austrian Tunneling Method).



Figura 91 – Tunnel: esempi di scavi a sezione parzializzata (sinistra) ed a tutta sezione (destra).

Nel progetto esecutivo sono normalmente definite le sezioni di scavo, in funzione delle quali si stabiliscono caratteristiche e quantità degli interventi di stabilizzazione definitivi, attuati generalmente in più fasi. La definizione delle sezioni tipo varia in funzione del prevedibile comportamento tensio-deformativo del fronte di scavo e della risposta deformativa, per effetto dello scavo, delle formazioni rocciose attraversate. Quando si crea una cavità in una massa rocciosa, si perde l'effetto di sostentamento del materiale scavato e la disposizione originale delle tensioni, l'equilibrio naturale, viene perturbato: si ha una risposta automatica del massivo roccioso, che tenta di ritrovare un nuovo stato di equilibrio. Le deformazioni della massa (Figura 92) nella direzione delle cavità, provocano la redistribuzione delle tensioni e degli sforzi, che sono deviati verso i lati del foro e che si concentrano in prossimità delle pareti laterali.

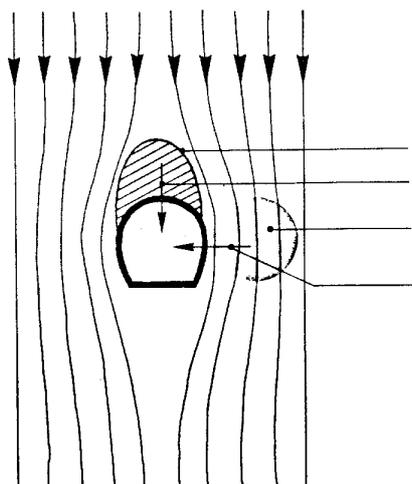


Figura 92 – Andamento delle tensioni nell'ammasso circostante il cavo.

Se il materiale roccioso circostante il cavo può resistere alla redistribuzione ed alla concentrazione delle tensioni stesse, si

determina uno stato autostabilizzante; più frequentemente, sono invece necessari sistemi di sostenimento supplementari, attraverso attività di bloccaggio superficiale e di consolidamento della roccia, con conseguente formazione del cosiddetto "arco roccioso autoportante".

È noto che, normalmente, la massa rocciosa è frazionata da fessure naturali, che seguono differenti direzioni e che lungo queste aree di debolezza si manifestano movimenti più o meno accentuati ed accelerati. Partendo dall'osservazione che le deformazioni del terreno durante lo scavo sono legate al comportamento del nucleo di avanzamento, si può assumere come elemento di classificazione la stabilità del fronte di avanzamento stesso. A seconda della risposta deformativa dello scavo da parte delle formazioni attraversate che può evolversi, in campo elastico od elasto-plastico, fino al collasso, si distinguono tre classi principali di comportamento:

- ✚ cat. A - fronte stabile nel tempo, comportamento di tipo lapideo, con fenomeni che evolvono immediatamente in campo elastico e di entità trascurabile;
- ✚ cat. B - fronte stabile a breve termine, comportamento di tipo coesivo, caratterizzato da fenomeni deformativi di tipo elastico d'entità trascurabile presso il fronte, che evolvono in campo plastico quando, con l'avanzamento, si attenua l'effetto di mantenimento dovuto al fronte stesso;
- ✚ cat. C - fronte instabile, comportamento di tipo sciolto, con fenomeni deformativi di tipo plastico, fino al collasso, che coinvolgono anche il fronte di scavo e che richiedono interventi conservativi di preconsolidamento, di presostegno e di precontenimento dell'ammasso roccioso circostante il cavo.

In particolare per le prime due categorie, gli interventi di contenimento delle convergenze avvengono attraverso interventi superficiali, rivolti essenzialmente ad impedire il decadimento delle pareti di scavo, in quanto si può evitare che una massa rocciosa si metta in movimento applicando forze molto piccole, mentre, una volta che questo movimento è iniziato, la stabilizzazione richiede azioni di intensità infinitamente più elevate. Normalmente, un leggero spessore di calcestruzzo proiettato, applicato sulla superficie della roccia immediatamente dopo lo scavo, riempie le fessure, i giunti e le fenditure, stabilizza la massa rocciosa stessa ed attiva la realizzazione di una struttura composita, costituita dal calcestruzzo proiettato e dal materiale lapideo circostante, formando l'arco roccioso autoportante. Naturalmente, nel caso di grandi sezioni trasversali in rocce di bassa qualità, questo intervento conservativo non è sufficiente, per cui bisogna progettare interventi di precontenimento, tipo pre-taglio meccanico, preconsolidamento del nucleo, bullonature radiali ed in molti casi realizzazione in prima fase dell'arco rovescio.

Il calcestruzzo proiettato (shotcrete – shotconcrete - spritzbeton)

Con questo termine si intende un conglomerato cementizio praticamente comparabile ad un calcestruzzo pompato, che viene messo in opera meccanicamente, attraverso una alimentazione ad aria compressa (metodo di applicazione per via secca) oppure a flusso denso (metodo di applicazione per via umida). È comunque fondamentale ribadire che il calcestruzzo proiettato è un calcestruzzo, sia pure speciale in quanto caratterizzato da ridotto diametro massimo dell'aggregato (normalmente $8 \div 15$ mm) e da elevato dosaggio di cemento (≥ 350 kg/mc), e come tale deve essere progettato, in relazione ai requisiti statici (resistenza meccanica) e di durabilità (resistenza alle aggressioni ambientali), come prescritto dall'attuale norma su "Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità", la UNI EN 206-1. I criteri di determinazione del mix design, le prescrizioni minime per la durabilità, per la produzione e il trasporto sono identiche rispetto ad un calcestruzzo ordinario. La differenza sostanziale tra un calcestruzzo proiettato e uno semplicemente pompato non è, quindi, ante posa in opera bensì sul prodotto finito, in opera dopo la proiezione. La principale differenza qualitativa viene determinata dal diverso tipo di compattazione, che è di tipo statico per i calcestruzzi ordinari, con vibrazione meccanica, e di tipo dinamico per i calcestruzzi proiettati sulle superfici (efficacia dipendente dalla velocità di uscita del conglomerato cementizio dalla lancia e dalla distanza del supporto).

Dalla nascita di questa tecnologia, che è possibile far risalire al 1911 negli Stati Uniti, lo shotcrete è stato caratterizzato da una continua evoluzione nelle tecniche applicative, in particolare per il miglioramento dei macchinari, mentre il suo aspetto ingegneristico è rimasto di "basso livello", in quanto normalmente (ed erroneamente) è stato ed è considerato solo come un elemento provvisorio dell'operazione di avanzamento.

Nell'ottobre 1999, è stata pubblicata la norma UNI 10834 "Classificazione, requisiti e controlli prima e dopo la proiezione, criteri di accettazione", che si configura anche come una Linea Guida, contenente anche istruzioni operative per la messa in opera del prodotto. I procedimenti oggi a disposizione per questa operazione, sono quelli detti per via secca e per via umida (Figura 93) e la scelta dell'uno o dell'altro sistema dipende dalle consuetudini del paese, conseguenti alla conoscenza tecnica, dal rendimento e dalla qualità prescritta.

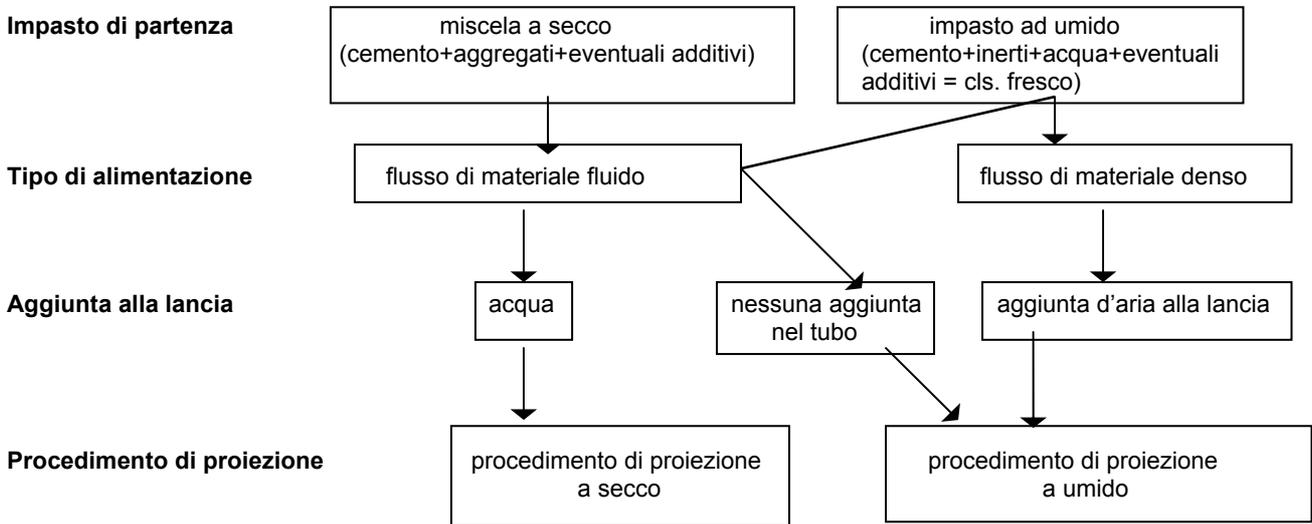


Figura 93 - Procedimenti di applicazione per proiezione meccanica.

La principale differenza tra i due processi applicativi, consiste nel momento di idratazione del cemento e nel tipo di trasporto della miscela. Con il procedimento per via secca (Figura 94) l'acqua d'idratazione viene aggiunta direttamente alla lancia di spruzzo e il trasporto è del tipo fluido, in corrente d'aria; nel secondo caso, per via umida (Figura 95), l'acqua viene aggiunta durante il confezionamento del calcestruzzo, nel pre-miscelatore o in autobetoniera, e il trasporto del prodotto alla lancia è a flusso denso, caratteristica normale di ogni calcestruzzo pompato.

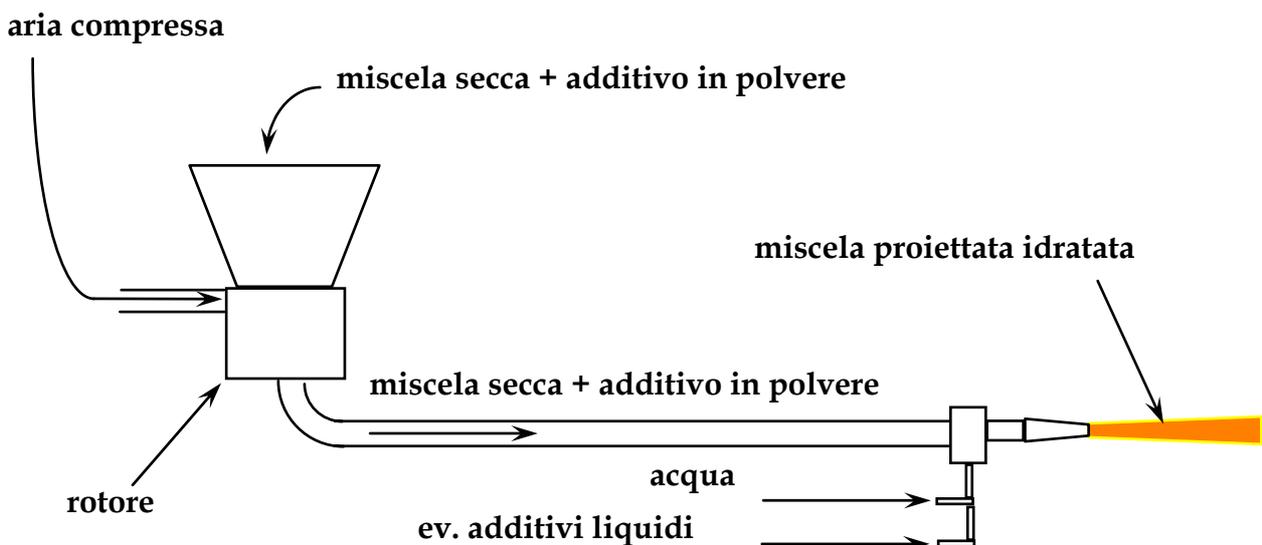


Figura 94 – Schema del processo per via secca.

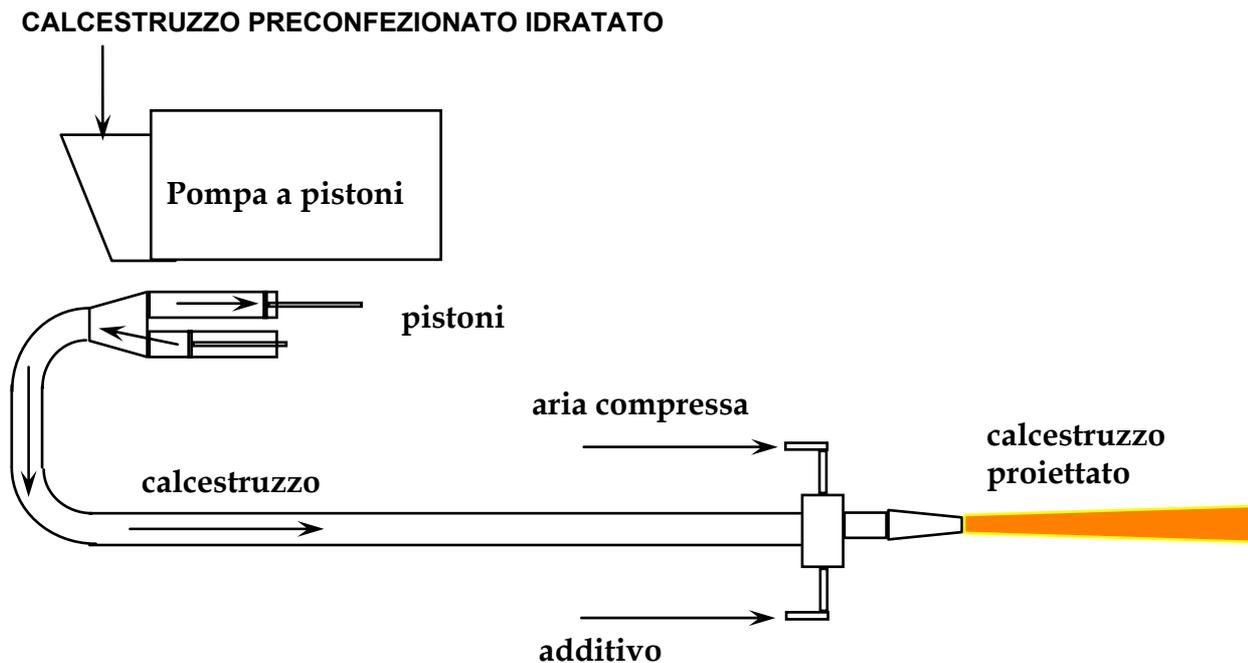


Figura 95 – Schema del processo per via umida.

Con entrambi i sistemi, il flusso viene accelerato, all'uscita dalla lancia di proiezione, per mezzo di aria, in diversa quantità a seconda del metodo utilizzato.

Nel procedimento per via secca, flusso di trasporto fluido, il fabbisogno di propellente è molto elevato, circa 12-15 mc/min per la messa in opera di 6 mc/ora di calcestruzzo proiettato, rispetto ai circa 8 mc/min per la proiezione di 8 mc/ora di spritzbeton via umida, flusso di trasporto denso.

Più aria significa anche più velocità di proiezione e quindi maggiore compattazione del prodotto e miglior adesione del rivestimento indurito al supporto, quindi una teorica migliore qualità del processo per via secca, rispetto a quella del metodo per via umida.

D'altra parte, un effetto collaterale del primo sistema è la formazione di polvere e di sfrido per rimbalzo, sia pure tecnicamente limitabili dalla capacità operativa dell'Operatore alla lancia. Il rimbalzo è costituito da quella parte di aggregato che, nella fase di spruzzo, non aderisce al sottofondo e cade assieme a cemento e acqua, in quantità più o meno elevata in relazione a:

- ✚ esperienza del lancista;
- ✚ distanza tra sottofondo e lancia;
- ✚ angolo di proiezione;
- ✚ rapporto acqua:cemento;
- ✚ tempo di presa;
- ✚ pressione d'aria e quindi velocità d'impatto;
- ✚ rapporto sabbia:cemento;
- ✚ composizione granulometrica;
- ✚ spessore dello strato applicato.

Un Operatore esperto riesce a contenere le percentuali di sfrido in:

TIPO SUPPORTO	VIA SECCA	VIA UMIDA
Parete inclinata	5 ÷ 10%	5 ÷ 10%
Parete verticale	15 ÷ 30%	10 ÷ 20%
Calotta	25 ÷ 40%	15 ÷ 30%

Ovviamente l'elevato sfrido si traduce in un conseguente elevato onere economico per l'impresa, in particolare quando si utilizza un calcestruzzo rinforzato con fibre, oltre ad una sostanziale modifica delle caratteristiche del betoncino in opera. Altro fattore di valutazione del sistema applicativo, che prende in considerazione il primario aspetto della salute del Lavoratore, è la polverosità dell'ambiente di lavoro, normalmente superiore nel caso di applicazione per via secca.

La pericolosità è funzione della sua quantità per m³ di aria, del tipo di polvere e del tempo di esposizione: numericamente, il rischio è espresso dal coefficiente MAK, che rappresenta la concentrazione limite che, con un'esposizione giornaliera di 8 ore, per 45 ore settimanali, non pregiudica la salute dell'operatore (Tabella 53).

% in peso di quarzo	Valore MAK d'aria (mg/mc)	Concentrazione di riferimento	Effetti sulla salute
< 1	6,0	polvere in generale	inerte
> 1 e < 3,75	4,0	polvere fine contenente quarzo	silicogena
> 3,75	0,15	polvere fine di quarzo	silicogena

Tabella 53 – Valori di coefficiente MAK.

In considerazione dell'alta incidenza dello sfrido e dell'elevata polverosità, tipico del metodo per via secca, oggi in Italia questo sistema è praticamente abbandonato, in favore di quello per via umida ed è su quest'ultimo che si riportano maggiormente le conoscenze acquisite.

Il calcestruzzo proiettato per via umida

Come è stato già indicato, il calcestruzzo proiettato per via umida deve essere considerato, con le opportune differenze, un normale calcestruzzo e come tale deve essere progettato. La differenza sostanziale è nella compattazione, data in questo caso dalla velocità di proiezione e dalla distanza della lancia dal supporto. Normalmente, il fattore di compattazione di un calcestruzzo proiettato con questo sistema è assunto pari a 1:1,25, quindi per ogni 1.000 l di betoncino scaricato nella tramoggia della pompa, si ottengono 800 l di rivestimento, non tenendo in conto quanto ulteriormente perso per lo sfrido.

L'Istituto T.F.B. di Wiledegg (CH), ha elaborato uno schema per tentare di definire i principali parametri che influenzano le qualità del calcestruzzo proiettato (Figura 96); in esso si focalizza l'attenzione su un numero elevatissimo di elementi da prendere in considerazione: dal tipo di accelerante, al cemento, agli aggregati, all'organizzazione del cantiere, al tipo di trasporto, al fattore tecnologico, ecc. In particolare si deve sempre considerare che questo, dopo l'applicazione, è caratterizzato da un dosaggio di cemento più elevato, rispetto a quello del mix originario, a causa dalle diverse percentuali di rimbalzo tra il cemento, l'aggregato e l'acqua (Tabella 54). L'aumento del tenore di cemento, mediamente pari al 15%, si traduce in una maggiore resistenza meccanica ma anche in una riduzione del rapporto aggregato:cemento e, quindi, a parità di rapporto a/c in un aumento del ritiro igrometrico, con conseguente rischio di fessurazioni.

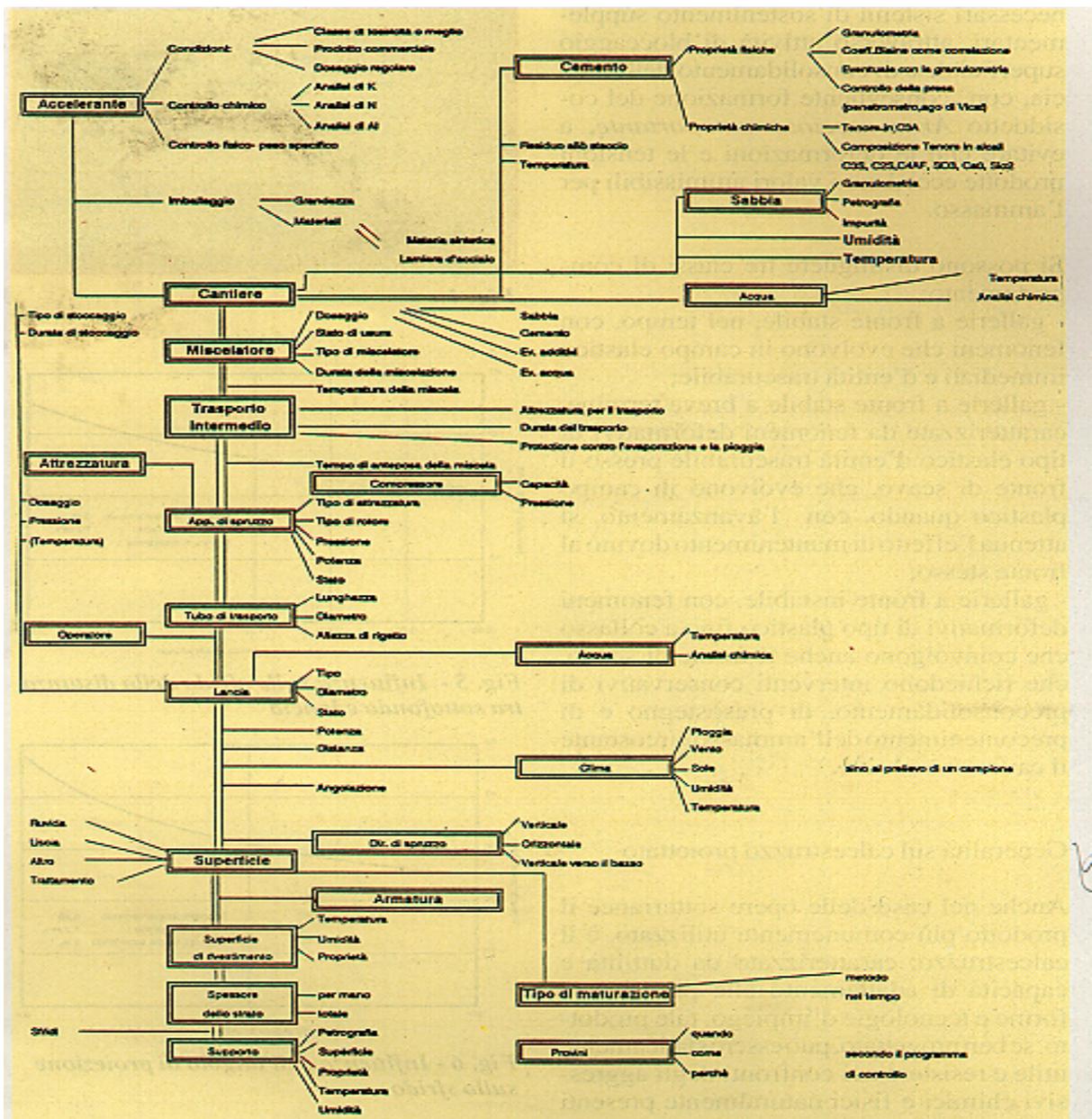


Figura 96 – Parametri che influenzano la qualità del calcestruzzo proiettato.

Mix del calcestruzzo prima della proiezione (per mc)	Analisi dello sfido	% sfido	Mix del calcestruzzo proiettato in opera	Mix del calcestruzzo in opera (per mc)
Aggregati 1.600 kg	480 kg	30	Aggregati 1.120 kg	Aggregati 1.508 kg
Cemento 500 kg	75 kg	15	Cemento 425 kg	Cemento 572 kg
Acqua 225 kg	45 kg	20	Acqua 180 kg	Acqua 242 kg
Peso totale 2.325 kg	600 kg	25	Peso totale 1.725 kg	Peso totale 2.322 kg
a/c = 0,45			a/c = 0,42	a/c = 0,42
i/c = 3,2:1			i/c = 2,6:1	i/c = 2,6:1

Tabella 54 – Modificazione del mix del calcestruzzo proiettato, causata dallo sfido differenziato.

È compito del Progettista e del Direttore dei Lavori prescrivere i dati fondamentali, mentre è compito del Responsabile della produzione del calcestruzzo proiettato valutare, dopo l'esecuzione di prove di qualificazione, la composizione della miscela in funzione del metodo applicativo scelto.

Indipendentemente da quanto detto, il rapporto contrattuale tra il Produttore del calcestruzzo e l'Applicatore, General Contractor o Impresa Specializzata che sia, è del tutto simile a quello per una normale fornitura di calcestruzzo che, in altre parole, potrà essere prescritto a "composizione richiesta", essendo stabilito il mix design sulla base delle prove preliminari, oppure a "prestazione garantita", sulla base delle prescrizioni del Capitolato Tecnico e in relazione alle caratteristiche finali del rivestimento. Nella stragrande maggioranza dei casi, il rapporto è del primo tipo per l'evidente difficoltà, da parte del Produttore, di valutare le modifiche subite dalla miscela, dopo la proiezione, sia per effetto dello sfido differenziato, che dei prodotti utilizzati durante l'applicazione per la coesivizzazione del calcestruzzo e per il rapido sviluppo delle resistenze meccaniche.

La prestazione che, quasi sempre, differenzia sostanzialmente il calcestruzzo proiettato da quello ordinario, è lo sviluppo delle resistenze meccaniche iniziali, a brevissimo termine, quindi da alcuni minuti a 3 – 6 ore, richieste in relazione ai diversi sistemi di avanzamento, alle convergenze dell'ammasso roccioso e alla possibile presenza di acqua filtrante.

La UNI 10834, classifica i calcestruzzi proiettati in funzione della resistenza (Tabella 55), della destinazione d'uso (Tabella 56) e dello sviluppo delle resistenze del calcestruzzo giovane, quindi nelle 24 ore (Tabella 57).

Classe di resistenza	Resistenza caratteristica R_{ck} in MPa
CP15	15
CP20	20
CP25	25
CP30	30
CP40	40

Tabella 55 – Classificazione del calcestruzzo proiettato in funzione della resistenza (UNI 10834).

	Destinazione d'uso	Sigla	Esempi d'utilizzo
			sottofondi riempimenti
	Non strutturale	TN	protezione scarpate provvisorie protezione superficiale
TEMPORANEO			protezioni di superfici di scavo in galleria gallerie di bypass
	Strutturale	TS	pedritti protezione superficiale protezione di superfici di scavo in galleria riempimenti
	Non strutturale	PN	protezione scarpate impermeabilizzazioni
PERMANENTE	Strutturale	PS	strutture monoguscio riparazioni, ristrutturazioni e rivestimenti di gallerie

Tabella 56 - Classificazione del calcestruzzo proiettato indurito in funzione della destinazione d'uso (UNI 10834).

Scadenze	Sviluppo normale MPa	Sviluppo rapido MPa
1 h	≥ 0,2	≥ 0,5
6 h	≥ 0,7	≥ 1,5
24 h	≥ 2,0	≥ 5,0

Tabella 57 – Classificazione del calcestruzzo giovane in funzione dello sviluppo delle resistenze meccaniche (UNI 10834).

Molto più puntuale, al riguardo, è la Guideline of Shotcrete della Österreichischer Betonverein, che consente di determinare i valori di resistenza, con metodi diretti ed indiretti, valutando anche quelli importantissimi raggiunti nei primi minuti dopo la proiezione. Si ricorda, tra l'altro, che per consentire al calcestruzzo proiettato di collaborare attivamente nella formazione dell'arco roccioso autoportante, è importante la rapidità di indurimento ed è sufficiente applicare una forza modesta, indicata in 0,5 MPa (Figura 97).

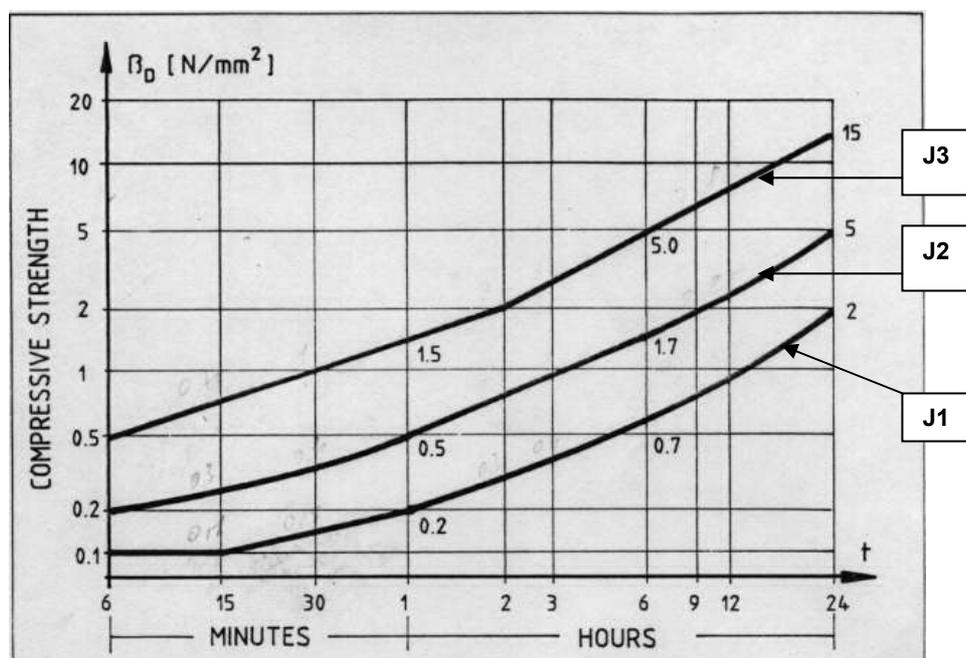


Figura 97 – Grafico sviluppo resistenze del calcestruzzo proiettato giovane, secondo la Guideline of Shotcrete.

È il tempo di raggiungimento di questo valore a determinare la classificazione del calcestruzzo proiettato e, quindi, tutte le valutazioni indispensabili per lo studio del corretto mix design del calcestruzzo. Con il grafico di Figura 98, risulta evidente che uno shotcrete tipo J1 raggiunge i 0,5 MPa in circa 5 ore, quello J2 in circa 1 ora ed il tipo J3, di impiego particolare, in 6 minuti. È su questa base che il Progettista può esprimere la corretta prescrizione, ed il Tecnologo organizzare le prove di qualifica e controllo, in situ o su piastra.

Per resistenze stimate uguali o inferiori a 15 N/mm², quindi orientativamente sino alle 24 ore, dall'applicazione, si utilizzano procedimenti indiretti, quali (Figura 98):

- ✚ tra 0,2 N/mm² e 1,2 N/mm², penetrometro modificato descritto dalla UNI 7123, dotato di punta ad ago con diametro di 3 ± 1 mm, apertura di 60 ± 1°; il metodo consente di calcolare solo indirettamente la resistenza meccanica a compressione, in base alla resistenza stimata (R_{stim}) e tramite idonee rette di correlazione predisposte per calcestruzzi con aggregato avente D_{max} 8 mm oppure 16 mm (Figura 99);
- ✚ tra 2 N/mm² e 15 N/mm², sparo/estrazione di chiodi (prigionieri), con impiego di una chiodatrice di sicurezza sparachiodi, dotata di cartucce esplosive di intensità nota (codice di

potenza 02), in grado di imprimere al chiodo una velocità iniziale tra 50 e 70 m/s; i prigionieri devono essere filettati e in acciaio al carbonio, con diametro di 3,7 mm e lunghezza tra 52 e 72 mm.

Altre indicazioni particolarmente utili, fornite dalla UNI 10834, riguardano le caratteristiche dei costituenti:

- ✚ il cemento deve essere conforme alla UNI EN 197-1;
- ✚ gli aggregati devono avere una dimensione massima in funzione del tipo di applicazione, comunque compresa tra 8 mm e 16 mm;
- ✚ gli additivi per la miscela di base (via umida), devono soddisfare i requisiti della UNI EN 934-2
- ✚ la miscela di base può essere modificata con aggiunte di tipo II (ceneri volanti o fumi di silice), con pigmenti e con fibre, sia sintetiche che metalliche;
- ✚ gli additivi per la proiezione devono essere conformi alla UNI EN 934-6:2007. In particolare, il dosaggio degli acceleranti di presa e indurimento non deve superare il 12% in massa sulla massa del cemento e questi additivi non devono causare l'abbattimento della resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo, a 28 giorni, rispetto a quelle del betoncino non additivato, superiore al 25%. Per motivi tecnici e di igiene del lavoro, dovrebbero preferibilmente essere utilizzati acceleranti definiti "alkali free", cioè con un contenuto di alcali equivalenti minore dell'1% in massa.

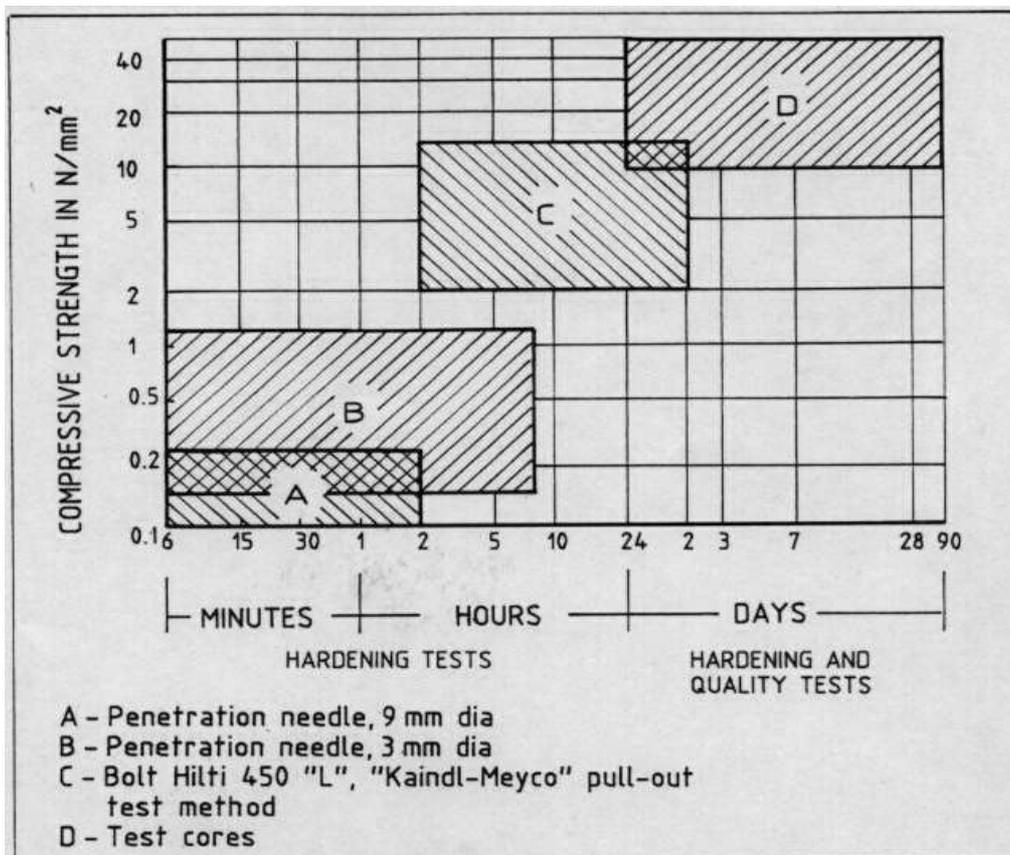


Figura 98 – Campi di validità delle prove meccaniche su calcestruzzo giovane e nel tempo successivo.

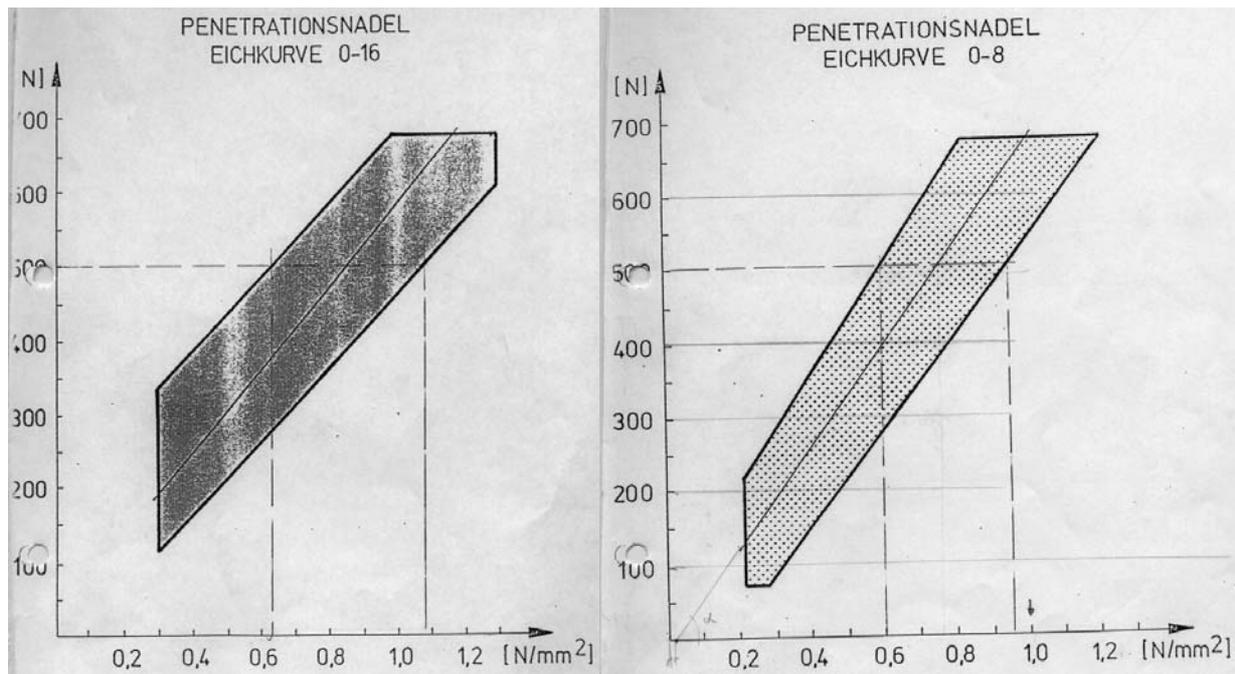


Figura 99 – Rette di correlazione nel sistema penetrometrico.

Nello studio del mix design delle miscele, si consiglia:

- ✚ di adottare la miscela granulometrica secondo Bolomey (aggregato + cemento);
- ✚ considerare, per le miscele da applicare per via secca, un rapporto in massa aggregato:cemento minore di 6 ed utilizzare sabbie con umidità superficiale non superiore al 6%;
- ✚ nel caso di proiezione per via umida, utilizzare un dosaggio di cemento ≥ 300 kg/mc.

La tecnologia dell'additivazione

L'additivazione del calcestruzzo proiettato può essere trattata con riferimento:

- ✚ alle modalità di confezionamento del calcestruzzo preconfezionato o confezionato in centrale e trasportato sino alla pompa;
- ✚ alla fase di "shotcreting", esaminando tipo e caratteristiche delle aggiunte effettuate nella tratta di tubazione dalla tramoggia alla lancia (Figura 94 e 95).

Si potrebbe, quindi, dire che l'additivazione del calcestruzzo ante-proiezione è a carico del Produttore del calcestruzzo, mentre quella nella fase di proiezione è di competenza dell'Applicatore.

Per l'additivazione ante-proiezione, fase nella quale non ci si dilungherà, in quanto trattata nei capitoli precedenti, i prodotti utilizzati sono quelli già ben conosciuti dai Tecnologi dei Preconfezionatori:

- ✚ superfluidificanti;
- ✚ reattivi pozzolanici;
- ✚ fibre.

Relativamente ai superfluidificanti, si ricorda che devono assicurare una fluidità ottimale, vedi classe S4, con un rapporto $a/c \leq 0,50$, così da garantire:

- ✚ ridotta permeabilità del betoncino indurito;
- ✚ ottimizzazione dell'efficacia degli additivi per la proiezione, in quanto più è alto il rapporto a/c meno efficiente è la loro azione;
- ✚ dispersione massima delle particelle ultrafini (cemento + filler), consentendone il massimo effetto tissotropizzante;
- ✚ la prestazione meccanica del calcestruzzo, anche tenendo conto degli effetti negativi derivanti dalle ulteriori aggiunte effettuate dall'applicatore, in particolare degli acceleranti alcalini (Tabella 60).

Più importante e da approfondire, è l'additivazione nella proiezione o shotcreting, in quanto il compito degli additivi in questa fase è quello di consentire l'autosostentamento del calcestruzzo durante l'applicazione, che viene normalmente applicato in singole passate di spessore anche superiori a 10 – 15 cm. In pratica, è indispensabile che la forza di coesione del calcestruzzo fresco, appena proiettato, sia maggiore del carico determinato dal peso del rivestimento applicato; a questo proposito si ricorda che per uno strato di un m², con spessore di 10 cm, il calcestruzzo pesa circa 230/240 kg.

Questa prestazione è raggiungibile:

- ✚ accelerando con idonei additivi la reazione di presa del legante;
- ✚ producendo un immediato ed eccezionale aumento della coesione del calcestruzzo fresco, attraverso l'aggiunta alla lancia di aggiuntivi gelogenici, con istantanea formazione di un gel per reazione tra il gelogeno ed il cemento.

Elementi fondamentali da tenere in considerazione, sono la velocità ed il metodo di avanzamento, nonché l'eventuale presenza di diffusi trasudamenti d'acqua, fattori che determinano la necessità di un più o meno rapido sviluppo delle resistenze meccaniche nel brevissimo e breve termine (da pochi minuti a poche ore).

Si analizza ora la più conosciuta famiglia di additivi per la proiezione, cioè quella degli acceleranti di presa e d'indurimento, che devono evidentemente essere compatibili con il cemento, con riguardo all'accelerazione del tempo di presa, rapido sviluppo delle resistenze e decremento delle stesse nel tempo.

Per una migliore comprensione del funzionamento degli acceleranti è utile richiamare, molto brevemente, qualche informazione circa i meccanismi della presa del cemento. Ognuno dei principali costituenti del clinker di Portland: il silicato tricalcico C₃S, il silicato bicalcico C₂S, l'alluminato tricalcico C₃A, il ferro-alluminato tetracalcico C₄AF e il gesso, esercitano un particolare compito nel processo della presa del cemento, differenziandosi per i diversi valori del calore di idratazione e di velocità di reazione.

La fase più reattiva è rappresentata dal C₃A che appena entra in contatto con l'acqua reagisce con il gesso, formando ettringite. Contemporaneamente, avviene la prima reazione tra il C₃A stesso, l'idrossido di calcio e l'acqua, che porta alla formazione di alluminato tetracalcico idrato. Queste forti reazioni iniziali, si bloccano dopo qualche minuto e inizia a manifestarsi, a questo punto, la cosiddetta "fase dormiente" dell'idratazione, che può estendersi anche per alcune ore e la cui fine caratterizza l'inizio della presa del cemento. È sulla durata di questa fase che si deve intervenire, riducendola anche drasticamente attraverso l'impiego di acceleranti di reazione.

È evidente che la composizione chimica del cemento non è il solo criterio per determinare la reattività del legante ma esistono altri parametri, quali la finezza di macinazione, il fabbisogno d'acqua e la temperatura.

Gli acceleranti per lo shotcreting possono essere classificati come:

- ✚ alcalini, spesso caustici, che riducono più o meno sensibilmente le resistenze meccaniche del calcestruzzo di base;
- ✚ alkali-free e non caustici che, al contrario, non determinano un quantificabile abbassamento della resistenza.

Della prima famiglia fanno parte i sali solubili di metalli alcalini e alcalino-terrosi, i più conosciuti dei quali sono i silicati di sodio e gli alluminati. I primi sono quelli di impiego più comune in Italia, per motivi di non ben valutato conto economico e per la violenta coesivizzazione del conglomerato in proiezione, con dosaggi tra il 15% e il 20% sul peso del cemento. Diversi autori hanno dimostrato che i silicati accelerano l'idratazione del C₃S, determinando anche la formazione di tobermorite in un tempo molto ristretto. Con il silicato di sodio questo fenomeno è ridotto per il grande apporto alcalino, responsabile della caduta delle resistenze finali del calcestruzzo indurito (Tabella 58) e dell'aumento dei fenomeni di ritiro e della formazione di efflorescenze.

Dosaggio silicato di sodio % sul cemento	Riduzione della resistenza in %
0	0
5	20
10	35
15	50
20	60
25	75
50	95

Tabella 58 – Perdita di resistenza sul calcestruzzo proiettato, in funzione del dosaggio di silicato di sodio.

Ne risulta che con dosaggio del 15%, di normalissimo impiego nei nostri cantieri, l'abbattimento della resistenza a 28 giorni, rispetto al calcestruzzo base, è del 50% circa.

La crescente richiesta di shotcrete idoneo per la realizzazione di rivestimenti finali, quindi caratterizzati anche da elevate resistenze meccaniche alle brevissime (da 6 minuti a 4 ore), brevi (da 24 a 48 ore) e lunghe stagionature (28 e 90 giorni), ha spinto alla ricerca di prodotti a limitata pericolosità, contenenti solo minime quantità di metalli alcalini, inferiori all'1%. Sulla spinta di un importante programma di ricerca europeo, si è arrivati alla formulazione e proposta sul mercato di additivi altamente prestazionali. Si tratta di prodotti a base di sali neutri inorganici o di acceleratori organici a reazione neutra; la prima base agisce in modo simile agli alluminati, accelerando la formazione di ettringite, i composti organici, invece, esercitano un effetto di densificazione della struttura cristallina del cemento idratato. Sono normalmente dosati in ragione del 4 ÷ 8% sul peso del cemento, con possibili perdite di resistenza pari a circa il 4 – 6%. La UNI 10834, Paragrafo 5.7.1. sostiene il loro impiego affermando che gli additivi per la proiezione devono assicurare:

- ✚ la resistenza a compressione, a 28 giorni, maggiore o uguale al 75% di quella del riferimento non accelerato;
- ✚ il soddisfacimento delle prescrizioni progettuali;
- ✚ l'assenza di riflessi negativi sull'igiene e sulla sicurezza sul luogo di lavoro;
- ✚ il rispetto delle leggi vigenti in materia di inquinamento nei confronti dell'ambiente naturale.

La proposta di proiezione del calcestruzzo senza acceleranti, quando non vengano richieste elevate resistenze iniziali, spesso è ancora accolta con perplessità da parte degli operatori italiani, molto condizionati dall'abitudine all'impiego di betoncini fortemente e spesso impropriamente accelerati con silicato di sodio, mentre questa tecnologia è già nota ed utilizzata al di fuori dei nostri confini. A tale scopo vengono utilizzati, in proiezione, additivi detti coesivizzanti, che determinano il rapidissimo "addensamento" del betoncino dopo la proiezione, che raggiunge in brevissimo tempo elevate resistenze di coesione interna, tali da assicurare l'autosostentamento dello shotcrete senza intervenire sulla presa del cemento, anche in calotta. La UNI 10834 nel Paragrafo 5.7.2 li definisce come "additivi che hanno lo scopo di fare rapprendere la miscela fresca in modo che il calcestruzzo proiettato possa autosostenersi, anche in elevato spessore".

Il sistema ormai molto collaudato, si basa sulle prestazioni della silice SiO_2 , il sol di silice o nanosilice, caratterizzato da un'elevatissima superficie specifica, pari a circa 200 – 350 m^2/g contro in 20 m^2/g del fumo di silice e gli 0,30 – 0,45 m^2/g del cemento. Questa tecnologia è chiaramente utilizzabile nel caso di impiego del metodo applicativo per via umida, in quanto può essere combinata con gli eventuali acceleranti, riducendone il dosaggio e/o da utilizzare solo nel caso di richiesta di rapidissimo sviluppo delle resistenze meccaniche.

Il vantaggio più evidente, nell'immediato, di questo tipo di additivazione, è la drastica riduzione degli sfridi che, sperimentalmente, passano dal 30% circa con silicato di sodio, al 15% circa con alkali-free, al 5% circa con sol di silice; nel tempo, le perdite di resistenza a compressione, anche a 28 giorni, potrebbero anche non manifestarsi nei confronti del calcestruzzo base.

Il mix design del calcestruzzo proiettato per via umida

Nel caso del calcestruzzo proiettato occorre prendere in considerazione oltre alle normali procedure utilizzate per ogni calcestruzzo (relativamente alla migliore composizione percentuale del mix degli aggregati, si consiglia il metodo di Bolomey, che considera anche il dosaggio di cemento, in questo caso normalmente elevato), anche le modifiche apportate, durante il confezionamento e l'applicazione, dagli additivi utilizzati, quali acceleranti, gelogeni, ecc.

In linea di massima, l'esperienza e la sperimentazione portano a consigliare:

- ✚ aggregati con diametro massimo non maggiore a 16 mm, in relazione alle attrezzature utilizzate;
- ✚ rispondenza dell'aggregato alle prescrizioni della UNI 8520;
- ✚ distribuzione granulometrica:
 - frazione 0 – 4 mm, tra il 50 ÷ 70%;
 - frazione 4 – 8 mm, tra il 20 ÷ 30%;
 - frazione 8 – 16 mm, tra il 10 ÷ 20%;
- ✚ è importante non eccedere nella percentuale prevista per la frazione 8 – 16 mm, onde evitare il corrispondente incremento della percentuale del rimbalzo;
- ✚ la quantità di aggregato frantumato non deve superare il 70% in peso del peso totale dell'aggregato;
- ✚ la curva granulometrica deve porre particolare attenzione al contenuto di finissimi, cemento + filler inerte + eventuale filler reattivo, al fine di assicurare la facile pompabilità ed ottimale riempimento dei cilindri delle pompa; per questo motivo si consiglia l'utilizzo del metodo di Bolomey.

Gli altri parametri essenziali da considerare sono:

- ✚ tipo e classe del cemento;
- ✚ classe di consistenza;
- ✚ classe di resistenza del calcestruzzo indurito.

Esempio di mix design

Assumendo di dover progettare un calcestruzzo proiettato caratterizzato da:

- ✚ classe di resistenza CP30;
- ✚ cemento CEM I – tipo 42,5 R;
- ✚ aggregato prevalentemente frantumato, diametro massimo 16 mm;
- ✚ classe di consistenza S4;
- ✚ classe di esposizione XD1 (ambiente moderatamente aggressivo per cloruri da sali disgelanti);

si ottiene:

- ✚ valore massimo di a/c per la resistenza = 0,56 (Tabella 59);
- ✚ valore massimo di a/c per la durabilità = 0,55;
- ✚ rapporto a/c adottato (valore più basso) = 0,55;
- ✚ fabbisogno di acqua per consistenza S4, aggregato frantumato D_{max} 16 mm, litri 240/mc;
- ✚ acqua ridotta con impiego superfluidificante acrilico (riduzione del 20%), litri 190/mc.

Il dosaggio di cemento per la miscela base è:

kg $(190/0,55) = 345 \div 350$ kg/mc.

La composizione, per un mc di calcestruzzo, è quindi:

Componente	kg	l	kg
Cemento	350	113	350
Acqua	190	190	190
Aria	0	10	0
Aggregato S.S.A.	-	687	1.820
Peso totale calcestruzzo fresco	-	-	2.360

Considerando le possibili perdite di resistenza dovuta alla fase di applicazione, con l'impiego di diversi additivi per la proiezione, i mix design possono essere ulteriormente raffinati (Tabella 60):

- ✚ A - silicato di sodio dosato al 15%, perdita pari al 50%;
- ✚ B - alkali-free dosato al 7%, perdita pari al 5%;
- ✚ C - gelogeno dosato al 2%, perdita pari allo 0%.

R _{ck}	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60
Rapporto a/c massimo								
Tipo cemento	a/c							
32.5	0,71	0,56	0,47	0,38	=	=	=	=
42.5	0,85	0,68	0,56	0,46	0,38	0,34	0,31	=
52.5	=	0,80	0,67	0,54	0,44	0,40	0,36	0,33

Tabella 59 - Rapporto a/c per data resistenza, in funzione del cemento.

Tipo di miscela		Base	A	B	C
Cemento	kg/mc	350	415	370	350
Acqua	kg/mc	190	225	200	190
Aggregato S.S.A.	kg/mc	1.820	1.700	1.800	1.820
Peso totale calcestruzzo fresco	kg/mc	2.360	2.340	2.370	2.360

Tabella 60 – Mix design dei calcestruzzi da proiettare con diverse tecnologie di additivazione, in funzione delle prescrizioni per resistenza e classe di durabilità.

Questi esempi nascono dall'esperienza nei cantieri e nell'affiancamento con alcuni tra i maggiori Esperti, Tecnologi o Progettisti nell'ambito dei tunnel, ma anche da un'attenta lettura dell'abbondante bibliografia relativa a questo argomento.

Come suggerimento, si consiglia di prendere quanto possibile dalle pubblicazioni dell'EFNARC, associazione Europea tra produttori ed applicatori di prodotti speciali per le costruzioni, in particolare:

- ✚ Specifications on Sprayed Concrete;
- ✚ European Specifications on Sprayed Concrete;
- ✚ Guide Line on Sprayed Concrete for Specifiers and Contractors;
- ✚ Specifications for Sprayed Concrete Execution.

CAPITOLO XIII

IL SISTEMA NORMATIVO EUROPEO ED I RIFLESSI IN ITALIA

Norma o raccomandazione? Tengo a precisare che la definizione di norma dovrebbe essere applicata solo alle leggi, mentre quello che si intende comunque con il nome di norma, vedi le UNI, altro non sono che raccomandazioni tecniche, alla stessa stregua delle Linee Guida, Codici di Buona Pratica e così via. Qual è allora la sostanziale differenza tra norme e raccomandazioni: le prime sono cogenti, in quanto leggi o decreti legge, le seconde sono volontaristiche, utilissimi riferimenti per il Progettista e per il Tecnologo, che tuttavia diventano cogenti solamente se richiamate da una legge o nei Capitolati d'Appalto.

Prima di affrontare, sia pure sinteticamente, il sistema delle normative, si vuole comunque ricordare che l'aspetto più importante per lo Strutturista è quello relativo al calcolo delle resistenze meccaniche e che tale valore deve essere espresso come "resistenza caratteristica". È bene quindi precisare cosa significa questo termine.

La dispersione dei valori e la resistenza caratteristica del calcestruzzo

Come è stato sottolineato nei capitoli precedenti, la resistenza a compressione è quella che si utilizza più frequentemente per definire la qualità del calcestruzzo in quanto, normalmente, ad un suo miglioramento corrisponde un miglioramento di tutte le altre qualità del conglomerato indurito. In fase di progettazione della costruzione, è compito del Calcolatore definirne preventivamente il valore in funzione delle sollecitazioni previste e, dall'esigenza che questa caratteristica del calcestruzzo sia garantita in ogni fase della costruzione, deriva l'importanza che i valori delle rotture a compressione, rilevati con l'esecuzione di regolari prelievi di campioni, non siano molto diversi gli uni dagli altri. Assume quindi sempre più importanza il concetto di "Controllo della qualità", che coincide con il controllo della produzione del calcestruzzo nelle diverse fasi che possono determinare le variazioni dei risultati e che si possono riassumere in:

- ✚ approvvigionamento delle materie prime;
- ✚ stoccaggio e conservazione delle materie prime;
- ✚ produzione del calcestruzzo;
- ✚ trasporto e messa in opera del calcestruzzo;
- ✚ maturazione protetta del calcestruzzo in opera;
- ✚ uniformità di confezionamento e stagionatura dei provini.

Prima di analizzare nei particolari quanto è stato indicato, è opportuno chiarire il concetto di dispersione dei risultati e la sua importanza agli effetti della qualità e dell'economia della produzione.

Un dato calcestruzzo può essere definito in funzione della sua resistenza media o della resistenza caratteristica, entrambe determinate dopo un periodo di maturazione standard, stabilito in 28 giorni, ed in condizioni di stagionatura definite. Quale è la differenza tra le due classificazioni?

Si consideri, ad esempio, un calcestruzzo per il quale il Calcolatore abbia previsto una resistenza a compressione a 28 giorni di 30 N/mm².

Se si effettuano una serie di prelievi su due diverse produzioni, potremmo avere i seguenti due casi:

Caso A	N/mm ²	Media	Caso B	N/mm ²	Media
Prelievo n°1	20,0		Prelievo n°1	28,0	
Prelievo n°2	25,0		Prelievo n°2	29,0	

Prelievo n°3	30,0	30,0 N/mm ²	Prelievo n°3	30,0	30,0 N/mm ²
Prelievo n°4	35,0		Prelievo n°4	31,0	
Prelievo n°5	40,0		Prelievo n°5	32,0	

Come si vede, in entrambi i casi la resistenza media del calcestruzzo è di 30 N/mm² ma, mentre con il calcestruzzo prodotto nel caso B le esigenze del Calcolatore possono essere sostanzialmente soddisfatte, nel caso A, la dispersione dei risultati e quindi l'ampiezza dei valori tra il minimo ed il massimo, è talmente elevata da compromettere l'omogeneità della struttura stessa in quanto, come nel caso di una catena, la resistenza dell'insieme sarà data dal suo punto più debole.

Per garantire quanto previsto dal Calcolatore, è quindi necessario considerare la resistenza richiesta come il valore minimo da raggiungere per un dato calcestruzzo. Adottando questo criterio, se si dovesse verificare una rilevante dispersione dei valori delle resistenze relative ad una fornitura, non ne risulterà, come si evince dall'esempio citato poc'anzi, diminuita la sicurezza, bensì dovrà essere semplicemente aumentata l'ampiezza dell'intervallo di sicurezza (differenza tra la resistenza media e la resistenza minima) che il produttore di calcestruzzo è tenuto ad assicurare per adempiere ai requisiti richiesti.

Questa sentita esigenza è stata recepita dal Legislatore italiano con l'emanazione della legge 5 novembre 1971 n. 1086 "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica", che impartisce disposizioni di carattere amministrativo per l'esecuzione delle varie opere e demanda le relative norme tecniche ai Decreti del Ministero dei Lavori Pubblici aggiornate, teoricamente, ogni due anni. Attraverso successive edizioni, si è giunti alla definizione che:

- ✚ agli effetti della norma un calcestruzzo viene individuato tramite la propria resistenza caratteristica a compressione;
- ✚ la resistenza caratteristica è definita come la resistenza a compressione al di sotto della quale si può attendere di trovare il 5% della popolazione di tutte le misure di resistenza a 28 giorni.

Viene, quindi, evidenziato il concetto di resistenza caratteristica R_{ck} , il cui valore è ottenuto deducendo, dal valore della resistenza media R_{cm} , un certo margine in funzione della dispersione dei risultati e del numero di prelievi effettuati su un calcestruzzo omogeneo (controllo di accettazione di tipo statistico).

Teoricamente la resistenza garantita di un calcestruzzo dovrebbe corrispondere alla sua resistenza minima ma, evidentemente, la ricerca di un minimo assoluto è praticamente impossibile ed inoltre è eccessivamente onerosa per il Produttore di calcestruzzo; per questo motivo si è definito che il valore della resistenza caratteristica di un dato impasto sia "la resistenza che probabilmente verrà raggiunta o superata dal 95 per cento di tutte le prove possibili".

Si è quindi scelto un limite, o soglia, oltre il quale si rischia che solo 5 prove su 100 diano un valore inferiore alla resistenza caratteristica, limite che è anche definito come frattile 5%.

Come abbiamo già visto precedentemente il calcestruzzo, come qualsiasi prodotto industriale ha, in fase di produzione, una certa oscillazione. Se in una data produzione di calcestruzzo omogeneo, si effettuano prelievi a determinati intervalli, le corrispondenti resistenze a compressione risultano differenti le une dalle altre. Esaminando la distribuzione di questi valori è possibile ripartirli in gruppi e costruire un istogramma, nel quale si riporta la frequenza dei campioni la cui resistenza è compresa in determinati intervalli (Figura 100) e nel quale si può riconoscere una distribuzione normale o gaussiana.

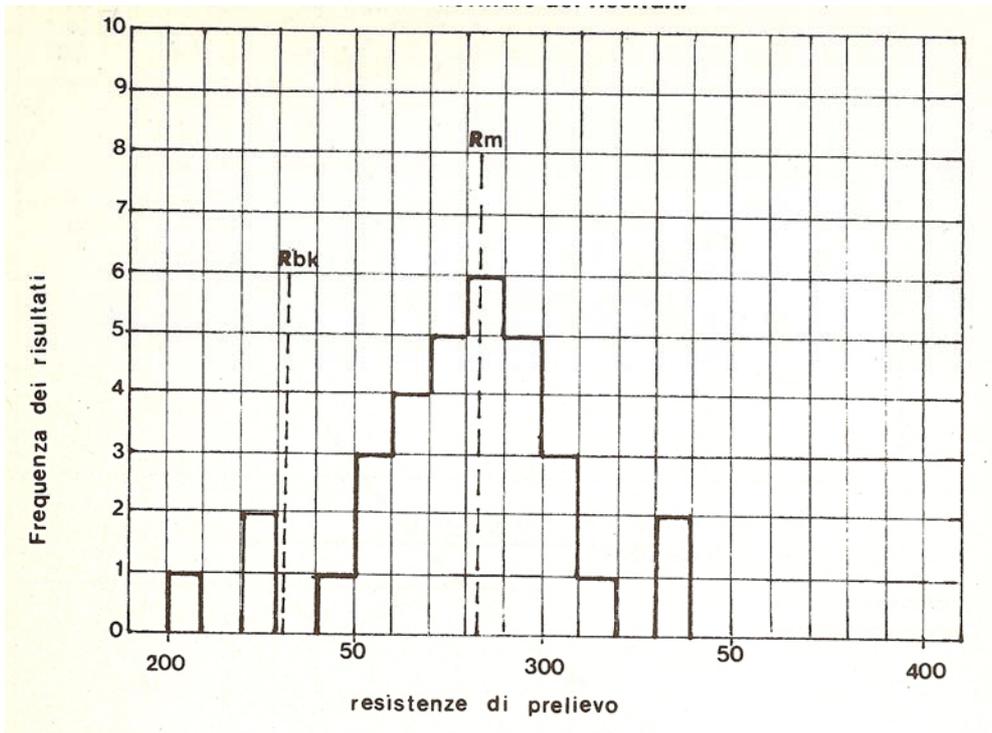


Figura 100 - Distribuzione statistica normale dei risultati.

Supponendo che dal calcestruzzo venga effettuato un numero infinito di prelievi e quindi che si ottenga un numero infinito di resistenze, la distribuzione dei risultati assume l'andamento di una curva a campana, o curva di Gauss (Figura 101), dove la resistenza media è quella che si verifica con maggiore frequenza e quindi corrisponde alla verticale passante per il punto di massimo.

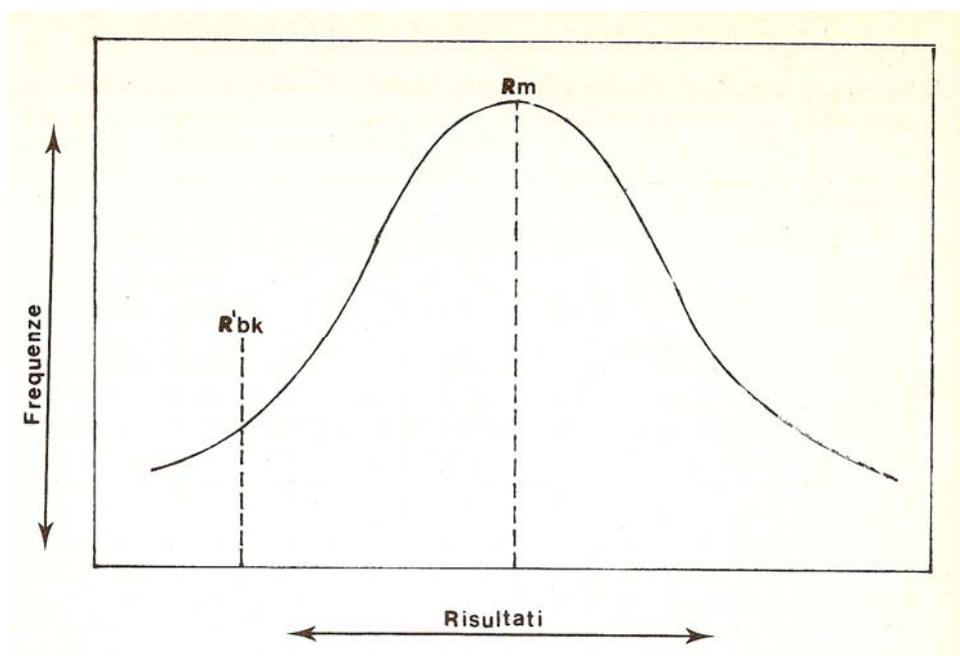


Figura 101 - Curva gaussiana.

Un più accentuato schiacciamento della campana corrisponde ad una maggiore dispersione dei risultati e quindi può dire che:

- ✚ un aumento della dispersione determina, a parità di resistenza media, un abbassamento della resistenza caratteristica (Figura 102);
- ✚ a parità di resistenza caratteristica, un aumento della dispersione determina una riduzione della resistenza media (Figura 103).

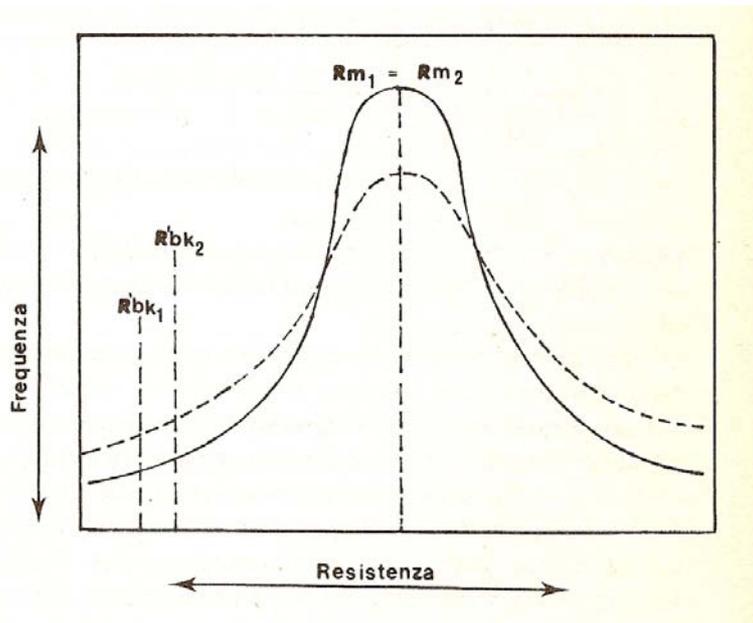


Figura 102 - R_{ck} in funzione della dispersione a parità di R_{cm} tra due calcestruzzi.

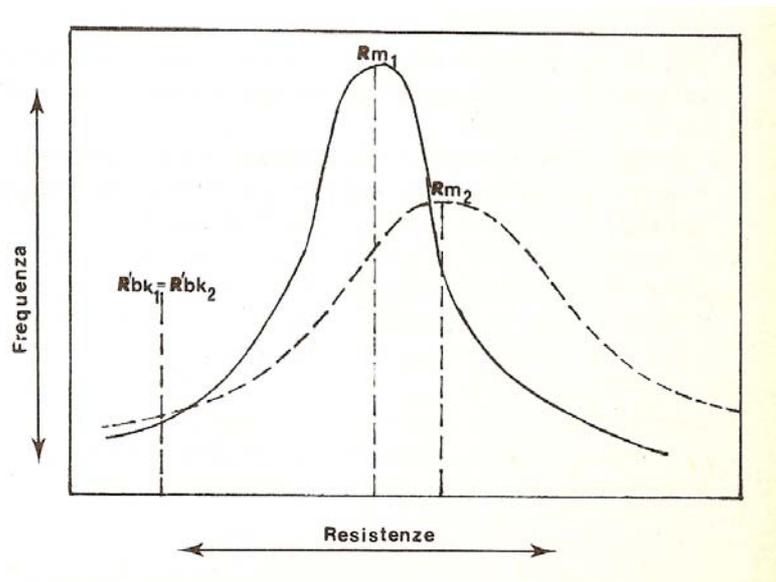


Figura 103 - R_{cm} in funzione della dispersione, a parità di R_{ck} .

La dispersione dei risultati, che si individua con lo scarto tipo, può essere attribuita a diversi fattori: il materiale, la macchina, il metodo e l'uomo. Questo testo non vuole, comunque, essere un trattato di statistica, per cui ci si limiterà ad esporre sinteticamente quanto indicato dalla nostra normativa o da altre più note. A questo proposito si ricorda solamente che lo scarto tipo, indipendentemente dalle normali variazioni di produzione, aumenta con il crescere della classe di resistenza del calcestruzzo, come indicato qui di seguito:

Classe cls	Scarto tipo (N/mm ²)	
	Buono	Scarso
R _{ck} (N/mm ²)		
20,0	≤ 4,5	≤ 6,0
30,0	≤ 4,9	≤ 6,4
40,0	≤ 5,3	≤ 6,8
50,0	≤ 5,7	≤ 7,2

Mediante un accurato controllo della produzione, è possibile riscontrare una sensibile riduzione di questo scarto; comunque si tratta di un'operazione fattibile solo in cantieri di grandi dimensioni o in centrali di confezionamento, mentre non risulta applicabile, in quanto antieconomica, in piccoli cantieri.

Secondo l'ACI Standard 214-65, esistono diverse cause di dispersione dei risultati dei provini prelevati da una data produzione di calcestruzzo omogeneo, a seconda che provengano da carichi diversi (A) o dallo stesso carico (B).

(A) - Dispersione di qualità riscontrata tra provini provenienti da carichi diversi. Possibili cause:

- ✚ variazione del rapporto acqua:cemento, dovuta a una trascurata sorveglianza dell'aggiunta d'acqua o a sensibili differenze dell'umidità dell'inerte;
- ✚ variazioni del fabbisogno di acqua, in relazione alla composizione granulometrica degli aggregati o al loro diverso potere di assorbimento;
- ✚ diversità qualitative e quantitative dei componenti, aggregati, cemento, additivi, ecc.;
- ✚ irregolarità nel trasporto, con irrigidimento dell'impasto e successive aggiunte d'acqua o differenti tipi di mescolazione;
- ✚ irregolarità climatiche durante la stagionatura del calcestruzzo e nel successivo trattamento.

(B) - Dispersione di prova, tra provini provenienti dallo stesso carico. Possibili cause:

- ✚ disuniforme prelievo dei campioni;
- ✚ differenti condizioni di preparazione dei campioni e quindi disuniforme indurimento, eccessivo tempo impiegato nella preparazione, disuniforme trattamento dei provini freschi;
- ✚ variazione delle condizioni di indurimento, dovute a diversità di temperatura e umidità dell'ambiente;
- ✚ difettosa esecuzione delle prove, per superfici non parallele dei provini e differente esecuzione delle prove stesse.

Il sistema normativo europeo

Il sistema normativo europeo si fonda su tre pilastri:

- ✚ il CEN, Comitato europeo di normazione per i prodotti in generale;
- ✚ il CENELEC, Comitato analogo al CEN ma per i prodotti del settore elettrico;
- ✚ l'EOTA, Organizzazione europea dei benestare tecnici.

Il Consiglio della Comunità Economica Europea ha proposto, come strategia per l'eliminazione degli ostacoli alla libera circolazione dei prodotti, l'emanazione di una serie di Direttive fondate sui seguenti principi:

- ✚ definizione dei requisiti essenziali a cui devono uniformarsi i prodotti per poter circolare nell'ambito della Comunità;
- ✚ emanazione, da parte degli organismi europei di normazione e su mandato della Comunità, di un sistema di norme tecniche armonizzate, che fissano le caratteristiche tecniche dei prodotti, con specifico riferimento ai requisiti essenziali;
- ✚ definizione delle modalità che devono essere adottate dai paesi membri, per l'attestazione delle conformità dei prodotti alle norme armonizzate, che sono evidenziate dall'apposizione sugli stessi del marchio CE.

Gli Stati membri, sono tenuti a recepire, nella propria legislazione, le cosiddette parti “armonizzate” delle norme tecniche europee, cioè quelle parti, emesse dal CEN su mandato della Comunità, sul cui contenuto sia stata raggiunta una maggioranza qualificata.

Nel settore delle costruzioni, il CEN ha elaborato ed ha in fase di elaborazione, numerose norme, che possono essere messe in diretto riferimento con i principali momenti di realizzazione di un’opera:

sceita dei materiali, progetto strutturale, esecuzione (Figura 104).

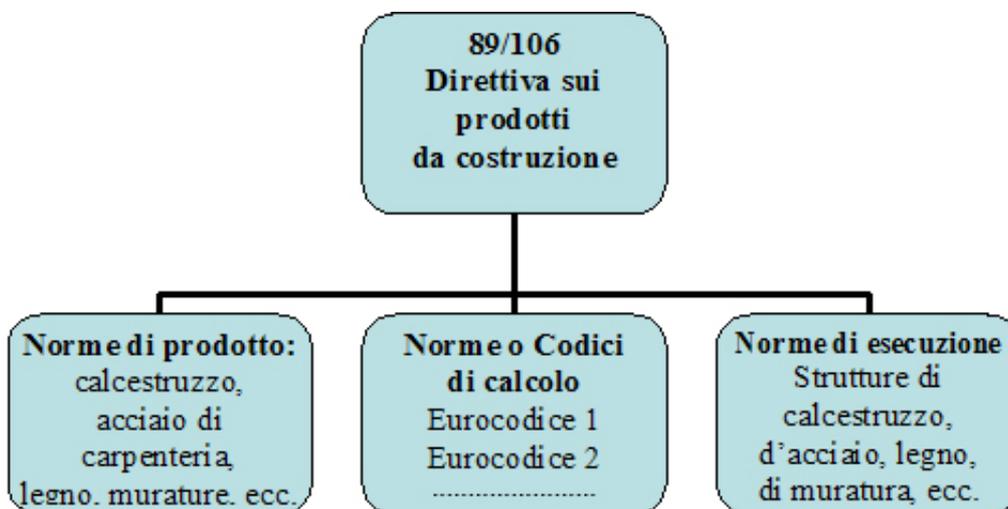


Figura 104 – Schema normativo europeo.

Poiché tali momenti devono essere tra loro coordinati sono stati individuati, per i materiali, degli specifici gruppi detti pacchetti, organizzati su tre livelli, che identificano quali norme devono essere contemporaneamente disponibili per poter garantire che l’intero sistema normativo di uno specifico settore sia completo ed operativo (Figura 105).

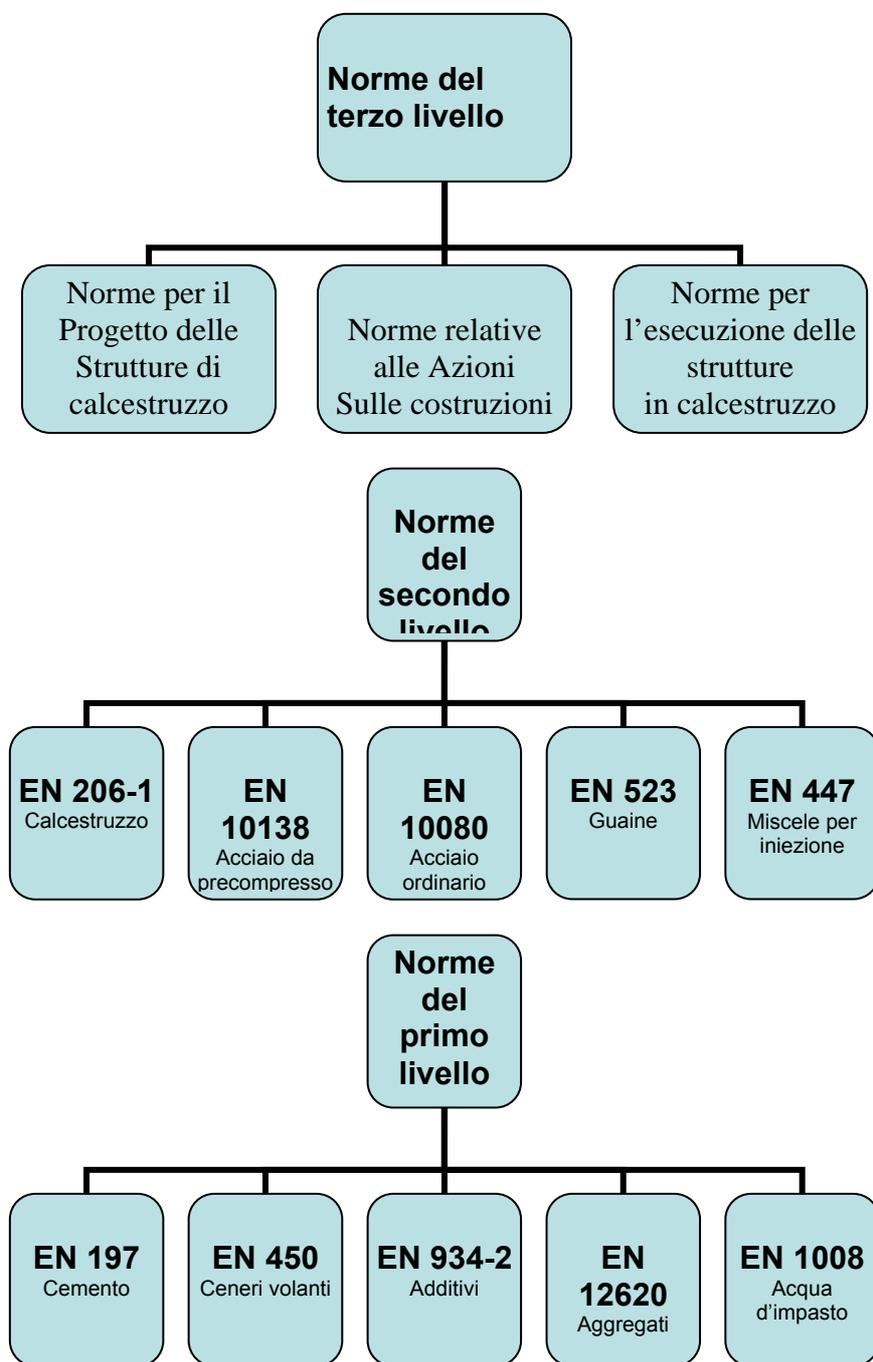


Figura 105 – I tre livelli del sistema normativo europeo.

La norma UNI EN 206-1

Questa norma ha sostituito integralmente la UNI 9858, escludendo quei riferimenti alle fasi di trasporto, controllo, messa in opera e stagionatura del calcestruzzo, che diventano parte di una norma per l'esecuzione, la UNI 11104. È costituita da nove capitoli e da una serie di allegati:

- ✚ Capp. 1-2 e 3, Scopo della norma;
- ✚ Cap. 4, Proprietà del calcestruzzo;
- ✚ Cap. 5, Caratteristiche prestazionali del calcestruzzo e dei suoi componenti;
- ✚ Cap. 6, Modalità di specifica del calcestruzzo;
- ✚ Cap. 7, Modalità di consegna del calcestruzzo;
- ✚ Capp 8 e 9, Criteri di prova/valutazione della conformità del calcestruzzo.

Gli aspetti innovativi della UNI EN 206-1 sono:

- ✚ nuova classificazione delle classi di esposizione ambientale (Tabella 61);
- ✚ presa in considerazione dei calcestruzzi leggeri;
- ✚ modalità di prescrizione del calcestruzzo;
- ✚ controlli di conformità;
- ✚ controlli di accettazione di singoli lotti.

Le prestazioni del calcestruzzo, prese in considerazione dalla UNI EN 206-1, riguardano sostanzialmente tre proprietà del conglomerato:

- ✚ resistenza meccanica caratteristica;
- ✚ impermeabilità all'acqua;
- ✚ durabilità in relazione all'ambiente;

Queste tre proprietà fondamentali devono garantire che il calcestruzzo:

- ✚ sia meccanicamente resistente alle sollecitazioni previste in esercizio;
- ✚ protegga l'interno di un'opera dalla penetrazione delle acque naturali;
- ✚ duri nel tempo resistendo alle sollecitazioni aggressive dell'ambiente.

Sono previste classi di resistenza meccanica, per ciascuna delle quali la valutazione può essere eseguita su provino cilindrico (altezza 300 mm, diametro 150 mm) o su provino cubico (lato 150 mm). Leggendo la Tabella 62, per esempio, la classe di resistenza C25/30 individua un calcestruzzo con una resistenza caratteristica di 25 N/mm² su cilindro (f_{ck}) o di 30 N/mm² su cubo (R_{ck}). La resistenza si misura, ovviamente, dopo 28 giorni di stagionatura dei provini, maturati a 20°C e con U.R. al 95%.

X0 - Ambiente senza rischio di aggressione – Per calcestruzzi senza armatura: tutte le esposizioni, eccetto i rischi di gelo/disgelo, abrasione o attacchi chimici – Per calcestruzzi armati: ambienti molto secchi.

XC - Ambiente in cui si ha carbonatazione e corrosione delle armature, con rischio progressivamente superiore passando da ambienti secchi o permanentemente umidi, ad umidi o relativamente secchi, da ambienti moderatamente umidi a ciclicamente bagnati ed asciutti.

XS - Ambiente in cui la corrosione delle armature è effetto dei cloruri che derivano dall'acqua di mare, spruzzati od in condizioni sommerse o nelle zone di splash.

XD - Ambiente in cui la corrosione delle armature è effetto dei cloruri da sali disgelanti, con condizioni come per XC.

XF - Ambiente in cui l'attacco del calcestruzzo è effetto dei cicli di gelo/disgelo, con quattro sottocondizioni di rischio.

XA - Ambiente in cui l'attacco del calcestruzzo è dovuto a sostanze chimiche di vario tipo, tipico delle aree industriali.

Tabella 61 – Classificazione delle classi di esposizione ambientale, secondo UNI EN 206-1.

Classe di resistenza (N/mm ²)	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55	C 50/60	C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
f _{ck}	8	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
R _{ck}	10	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	115

Tabella 62 – Le classi di resistenza a compressione, secondo UNI EN 206-1.

Uno degli elementi maggiormente caratterizzanti la norma, a convalida di quanto già espresso dalla UNI 9858, è la classificazione dell'ambiente nel quale deve vivere la struttura in calcestruzzo o in cemento armato. Viene, cioè, esplicitamente riconosciuto che l'aggressività dell'ambiente nei riguardi del calcestruzzo varia significativamente a seconda della localizzazione dell'opera stessa, oltre che alla destinazione d'uso. Sono previste sei classi di esposizione (Tabella 61), suddivise in diciotto sottoclassi, che identificano i diversi tipi di aggressione analizzati e il livello della loro aggressività (1, 2,...). Per la classe di esposizione XA, in una tabella a parte sono elencati i valori limite di concentrazione, nelle acque e nei terreni, degli ioni solfato, magnesio ed ammoniaca, del pH dell'acqua e del tenore di anidride carbonica.

Per ciascuna classe/sottoclasse, una tabella del Cap. 4 evidenzia le caratteristiche prestazionali e composizionali della miscela durabile, come:

- ✚ rapporto a/c massimo;
- ✚ classe di resistenza minima;
- ✚ contenuto minimo di cemento;
- ✚ il contenuto minimo di aria aggiunta (solo per le sottoclassi XF2 – XF3 e XF4);
- ✚ ulteriori requisiti su aggregati e sui cementi, per le Classi XF e XA.

Tranne che per la classe X0 (ambiente senza rischio di aggressione) e la sottoclasse XC1 (carbonatazione in ambiente asciutto), i rapporti a/c sono compresi tra 0,45 e 0,60 e le resistenze tra C25/30 e C35/45. L'identificazione della durabilità del calcestruzzo attraverso una specifica classe di resistenza, in funzione delle classi di esposizione, è la più concreta e semplice modalità di prescrizione di questa importantissima proprietà, in quanto ad un aumento della resistenza corrisponde, generalmente, maggiore compattezza e quindi ridotta permeabilità del conglomerato indurito. Per quanto sopra, è indispensabile adottare le classi di resistenza caratteristica minime richieste per la durabilità nelle varie situazioni, anche se queste risultano mediamente superiori rispetto a quelle usuali nel nostro paese e, talvolta, maggiori di quelle prescrivibili per la statica.

Come si vede in Tabella 62, le classi di resistenza sono classificate da C8/10 a C100/115 (Cxx/yy significa che xx è riferito a prove su cilindri, yy su cubi) e l'elevazione a valori così alti richiama una realtà diffusa nel Nord Europa, estendendo la classificazione ai calcestruzzi:

- ✚ A.P. (Alta Prestazione) con $C60 \leq R_{ck} \leq 75$;
- ✚ A.R. (Alta Resistenza) con $C85 \leq R_{ck} \leq C115$.

Il Cap. 5 della norma, fornisce un elenco dei requisiti richiesti ai componenti del calcestruzzo, quindi cemento, acqua, aggregati, additivi ed aggiunte, le cui caratteristiche fondamentali sono fissate nelle norme tecniche specifiche.

Relativamente alle aggiunte, che si ricorda possono essere di tipo I o di tipo II, si riconosce la loro importanza, sia agli effetti del miglioramento generale delle prestazioni del calcestruzzo, sia, per quelle di tipo II, per la parziale sostituzione del cemento, attraverso il valore k. Il concetto di valore k può essere diverso da paese a paese ma significa sostanzialmente considerare:

- ✚ con solo cemento, il rapporto acqua/cemento;
- ✚ con le aggiunte di tipo II, il rapporto acqua/ cemento + (k x aggiunta).

Il valore k dipende dalle specifiche aggiunte:

- per le ceneri volanti, con CEM I 32,5, k = 0,2, con CEM I da 42,45 in su, k = 0,4;
- per i fumi di silice, con a/c ≤ 0,45, k = 2,0, con a/c > 0,45, k = 2,0 (salvo per classi di esposizione XC e XF, nelle quali k è sempre uguale a 1,0).

Il Tecnico dovrebbe anche sapere che, nel caso di uso combinato di cenere volante e di fumo di silice, al fine di assicurare un sufficiente livello di alcalinità delle soluzione permeante i pori del calcestruzzo, si dovrebbe calcolare che:

- + cenere volante $\leq (0,66 \times \text{cemento}) - (3 \times \text{fumo di silice})$ in massa;
- + rapporto fumo di silice/cemento $\leq 0,11$ in massa.

Vengono, inoltre, fornite indicazioni circa il contenuto massimo di cloruri (in massa):

- + per calcestruzzo non armato $\leq 1,0\%$;
- + per calcestruzzo armato in generale (con armatura lenta) $\leq 0,4\%$;
- + per cemento armato precompresso, con armature post-tese e protette $\leq 0,2\%$;
- + per cemento armato precompresso, con armature annegate nel getto $\leq 0,1\%$.

Il Cap. 6 della norma dice che il calcestruzzo può essere prescritto, in alternativa:

- + come materiale a prestazione garantita;
- + come materiale a composizione richiesta.

I calcestruzzi a prestazione garantita, sono prescritti attraverso: classe di resistenza caratteristica, classe di esposizione, diametro massimo dell'aggregato, classe di consistenza e contenuto di cloruri.

Quelli a composizione richiesta devono essere prescritti individuando il tipo, le caratteristiche e la quantità di tutti i componenti la miscela. È basilare ricordare, inoltre, che un calcestruzzo non può essere correttamente prescritto, quindi ordinato e prodotto, se ne viene specificata solo la classe di resistenza o, per quelli a composizione, il solo dosaggio di cemento.

La UNI EN 206-1 è certamente una norma di compromesso ma, anche, una norma moderna, aperta all'evoluzione tecnologica e della conoscenza in generale, al passo con i tempi. È alla base di un sistema normativo per le opere in calcestruzzo, che comprende anche gli Eurocodici e le norme sull'esecuzione delle strutture, ovvero una buona base di partenza per la redazione di Capitolati Tecnici prestazionali.

CAPITOLO XIV

LE MALTE CEMENTIZIE PER LA RIPARAZIONE DEL CALCESTRUZZO: CRITERI DI SCELTA

La manutenzione di un'opera in calcestruzzo

Molto è stato compreso di questo apparentemente semplice ma in realtà estremamente complesso materiale, il calcestruzzo; molto lavoro è ancora da compiere, specialmente per trasmettere queste conoscenze al più ampio numero possibile di Operatori del settore.

In particolare, è ormai culturalmente assimilato il fatto che il degrado di una struttura in calcestruzzo, normale od armato, è il naturale destino di un manufatto realizzato dall'uomo e che deve essere prescrizione progettuale prefissarne il tempo di "vita utile". Questo tempo è assimilabile al concetto di durabilità del materiale ed è prolungabile, anche in carenza di capacità del conglomerato cementizio, tramite opportune attività, che ogni "Proprietario" dovrebbe espletare sull'opera per:

- + controllare lo stato;
- + conservarla, con interventi preventivi;
- + ripristinarla, con riparazione delle degradazioni;
- + adeguarla, con l'impiego delle nuove conoscenze.

L'insieme di queste azioni è definito come "manutenzione dell'opera", con interventi più o meno programmati, in relazione alla capacità di osservazione, di pensiero e soprattutto economica del Responsabile dell'esercizio. È evidente che è diverso il rapporto di verifica/analisi costo di un Privato, che valuta il costo manutenzione della propria villetta (manutenzione in genere più estetica che funzionale) e di un Ente proprietario/concessionario di una struttura di pubblico interesse, che valuta invece la manutenzione come un vero e proprio studio di costo/funzione.

In ogni caso bisogna individuare, nel modo più dettagliato possibile, le cause che determinano la necessità di manutenzione, attraverso indagini visive, analisi degli stati e quindi progettare gli interventi secondo ben precisi parametri:

- + dove intervenire, cioè il punto dove l'intervento è necessario;
- + come intervenire, quindi il tipo di intervento;
- + quando intervenire, valutando il momento più adatto per il lavoro;
- + quanto costa intervenire, comparando la necessità di prolungare per un lungo tempo la vita utile dell'opera con il costo della demolizione e ricostruzione dell'opera stessa.

È comunque da tenere in evidenza la filosofia che deve finalizzare la scelta del tipo di intervento e dei materiali da utilizzare: **È SBAGLIATO FARE UN RIPRISTINO CHE NON SIA ESSO STESSO DUREVOLE E CHE NON APPORTI DURABILITÀ ALL'OPERA.**

Qualunque sia la causa del degrado, si deve generalmente considerare che decade prima l'autoprotezione e successivamente la resistenza strutturale.

I possibili interventi, in relazione alla gravità del danno o al problema funzionale della struttura, si possono definire come:

- + manutenzione ordinaria o straordinaria, volta a mantenere le opere in piena efficienza secondo le tipologie costruttive originarie;
- + restauro statico, finalizzato al ripristino della capacità portante originaria dell'opera;
- + adeguamento funzionale quando, sia pure mantenendo sostanzialmente inalterate le geometrie e lo schema statico originari, si prevedono azioni maggiori o comunque diverse da quelle originarie;
- + ristrutturazione, che comporta una radicale modifica dello schema statico originario e/o delle caratteristiche geometriche dell'opera, per ripristinare ed aumentare la sua capacità portante.

Gli interventi previsti nelle ultime due voci possono evidentemente essere attuati anche in presenza di strutture in buono stato di conservazione.

Da quanto sopra, le tecniche d'intervento possono essere sostanzialmente raggruppate sotto le voci tecniche protettive e tecniche di riparazione.

Nel primo caso ci si trova di fronte all'applicazione di rivestimenti in spessore sottile (da qualche micron sino a 4÷5 cm), con il compito essenziale di riprofilare e proteggere la struttura esistente, alla quale è comunque demandata la funzione portante.

Nel secondo caso si utilizzano rinforzi strutturali, consistenti in collaborazioni o sostituzioni che, comunque, subentrano parzialmente od integralmente alla vecchia struttura, anche nella propria funzione portante.

L'esatta collocazione dell'intervento da progettare è condizione indispensabile per la successiva scelta delle tecniche operative e dei materiali da utilizzare. Certo, il compito del Progettista viene complicato da una inadeguata carenza di norme tecniche di intervento e di guide applicative, al contrario di quanto in atto nei confronti del calcestruzzo, che ha visto un adeguamento e perfezionamento di leggi e norme (vedi UNI EN 206-1).

Da questa carenza, forse voluta per creare confusione e consentire la presenza sul mercato di una miriade di prodotti più o meno "miracolosi", nasce la necessità di valutare, ancor più della qualità del prodotto, la qualità dell'azienda fornitrice, con le sue esperienze applicative e i suoi materiali specifici.

In altre parole è opportuno considerare più concretamente l'opportunità di iscriversi in Capitolato che "i prodotti dovranno essere forniti da azienda dotata di schede tecniche garantite e di certificazione di qualità"

Criteri di scelta delle malte cementizie

Oggi si dispone, fondamentalmente, di tre principali famiglie di materiali per la protezione del calcestruzzo:

- ✚ le malte cementizie monomodificate (fibrorinforzate, a ritiro compensato, tixotropiche, autolivellanti, ecc.);
- ✚ le malte cementizie plurimodificate con polimeri sintetici (acrilici e/o epossidici);
- ✚ le malte sintetiche, a base esclusivamente di polimeri (epossidici, poliuretanic, ecc.).

In riferimento alle sole malte cementizie, si possono ulteriormente classificare, secondo la forma, in:

- ✚ malte mono-componenti;
- ✚ malte bi e tri-componenti.

Il criterio di scelta del materiale, consiste essenzialmente nell'offrire un rimedio che risponda ad una serie di esigenze ed aspetti spesso contrastanti tra di loro, per cui si conferma che è fondamentale la profonda conoscenza della causa da cui dipende il degrado e delle caratteristiche dei prodotti da utilizzare.

In generale è preferibile utilizzare un prodotto a base cementizia per:

- ✚ tecniche di protezione e riparazione del calcestruzzo, quando non vengano prescritti particolari requisiti (quali resistenze chimiche, tempi di messa in esercizio del manufatto molto rapidi, ecc.);
- ✚ trattamenti esterni di grandi superfici;
- ✚ impiego di grossi volumi di prodotto.

Sicuramente le proprietà tecniche quali la resistenza a trazione, a compressione a breve termine, a flessione-trazione, nonché la resistenza chimica, sono migliori nelle malte epossidiche piuttosto che nelle malte cementizie.

Al contrario, le malte cementizie offrono un coefficiente di dilatazione termica congruo con quello del calcestruzzo, maggiore resistenza al calore ed al fuoco, maggiore permeabilità al vapore d'acqua e, fattore non trascurabile, più alta familiarità applicativa da parte degli Operatori.

Nell'ambito delle miscele a base cementizia, i campi d'impiego prevalenti sono:

- ✚ per le malte cementizie fibrorinforzate e/o a ritiro compensato, tixotropiche, placature a sbruffo con applicazione manuale o meccanica, a basso spessore (fino a 4 - 5 cm) su strutture massicce, soggette prevalentemente a compressione (pilastri, pile e simili);
- ✚ per le malte cementizie bi e tri-componenti, il ripristino corticale o la rifinitura di strutture soggette a forti deformazioni per flessione e/o trazione (travi in c.a.p.), con l'impiego di prodotti a basso modulo elastico (da 6.000 a 15.000 N/mm²), con bassi spessori di ricoprimento (massimo 2 cm) e funzione di intonaco protettivo; per il ripristino corticale di strutture a deformazione di tipo flessionale medio bassa (travi ad armatura lenta) oppure anche di strutture compresse di tipo snello, con modulo elastico normale (> 15.000 N/mm² e < 20000 N/mm²).

In particolare, ci si vuole soffermare sul problema delle deformazioni che subisce qualsiasi malta da riparazione; nel caso di prodotti a base cementizia o cementizia modificata con polimeri, le

maggiori deformazioni sono causate dal fenomeno del ritiro in fase di essiccamento del riporto; tra gli scopi principali di una riparazione, vi è senza dubbio quello di assicurare una buona aderenza tra il vecchio substrato ed il riporto stesso. Se le tensioni che si creano, che si ripercuotono tanto sulla malta quanto sul supporto, superano i valori ammissibili si avrà, come conseguenza, la rottura della riparazione effettuata. Per ridurre il fenomeno del ritiro è necessario curare la migliore composizione granulometrica dell'aggregato, contenere il rapporto a/c e determinare correttamente il tipo e la quantità del cemento da utilizzare, risulta evidente che l'opportuno e corretto dimensionamento di tutte queste grandezze è industrialmente assicurato dall'impiego di malte cementizie pronte, meglio se bi o tri-componenti, in quanto predosate, senza possibilità di errori da parte dell'Operatore.

Altri fattori, oltre al ritiro, influenzano i lavori di ripristino e, tra i più importanti, si possono annoverare i moduli elastici del supporto e del riporto; un basso modulo elastico della malta cementizia, rispetto a quello del calcestruzzo di supporto, determina l'incremento del potere di ancoraggio della riparazione. Questo concetto vale maggiormente nel caso di riparazioni corticali, cioè nelle riprofilature a ridotto spessore e protettive, nelle quali gli sforzi che interessano il manufatto si ripercuotono in misura prevalente sul sottofondo, più rigido e solo marginalmente interessano la riparazione, evitandone il distacco. Inoltre, una malta con modulo elastico basso consentirà una maggiore resistenza agli sforzi di flesso-trazione. Questo è il comportamento tipico delle malte cementizie modificate con polimeri sintetici, premiscelati nella componente anidra (malte monocomponenti) od in emulsione (malte bi e tri-componenti predosate).

D'altra parte, nel caso di un restauro statico è necessario utilizzare malte cementizie ad alto modulo elastico, in quanto la rigidità delle malte deve essere eguale o superiore a quella del calcestruzzo da riparare, così che il ripristino collabori con il resto della struttura nell'assorbimento degli sforzi (Tabella 63).

Parametro	Malta tixotropica mono-componente	Malta bi-componente basso M.E.	Malta bi-componente alto M.E.	Malta tri-componente
Resistenza a compressione (N/mm²) a 3 gg. a 28 gg.	30 – 35 50 - 60	6 – 10 15 - 25	30 – 35 50 - 60	20 – 30 30 - 35
Resistenza a flessione (N/mm²) a 3 gg. a 28 gg.	3 – 5 5 - 7	6 – 8 11 - 14	4 – 6 9 - 11	6 – 8 8 - 11
Adesione al calcestruzzo (N/mm²) a 3 gg. a 28 gg.	1 – 1,5 2 – 2,5	= > 2,5	= > 2,5	> 2,5 > 3,5
Modulo elastico (N/mm²)	25.000 – 30.000	6.000 – 15.000	15.000 – 25.000	6.000 – 15.000

Tabella 63 - Parametri meccanici tipici di diverse famiglie e di malte cementizie da riparazione.

Di conseguenza risultano piuttosto chiari i criteri di scelta e i parametri fissi che devono orientare il Prescrittore nell'individuazione del prodotto, in relazione al tipo di intervento previsto:

- ✚ più lo spessore del rivestimento è sottile, tanto più è necessario utilizzare malte cementizie a basso modulo elastico, per evitare i rischi di distacco per delaminazione da carico;
- ✚ più la struttura è soggetta a deformazioni per flessione e trazione, tanto più basso deve essere il modulo elastico;
- ✚ più l'intervento si prefigura di tipo statico, con necessità di sostituire il calcestruzzo originario nella funzione di assorbimento della compressione, tanto più il modulo elastico deve essere uguale, o meglio superiore, a quello del conglomerato che sostituisce.

D'altra parte è chiaro che, oltre al parametro meccanico del rivestimento, va considerata la resistenza della malta cementizia rispetto all'agente aggressivo che ha determinato lo stato di

degrado del calcestruzzo. Questo aspetto diventa essenziale nel caso di interventi di carattere corticale, che assumono normalmente funzione di protezione del substrato e delle armature metalliche.

Le cause di aggressione a cui normalmente ci si deve riferire, nella pratica quotidiana, sono essenzialmente determinate da:

- ✚ cause chimiche, per azione dell'anidride carbonica ed anidride solforosa, solfati e cloruri (questi due ultimi presenti essenzialmente nelle acque di contatto, di falda o meteoriche);
- ✚ cause fisiche per alternanza dei cicli di gelo e disgelo, essiccazione e alte temperature;
- ✚ cause meccaniche, dovute ad abrasione di sostanze solide trasportate dall'acqua, cavitazione, ecc.

Il prodotto prescritto deve, pertanto, essere resistente nei confronti di questi aggressivi naturali, mentre è demandata ad altri materiali e sistemi, normalmente epossidici o poliesteri, la capacità chimico-resistente tipica del trattamento di strutture industriali (depuratori, fognature, pavimentazioni industriali, ecc.).

Tra le aggressioni "naturali", quella maggiormente diffusa e i cui effetti degradanti sono sotto gli occhi di tutti, è quella detta da carbonatazione, cioè la reazione dell'anidride carbonica con la calce liberata durante l'idratazione del cemento, con finale riduzione del pH della soluzione permanente nei capillari del conglomerato cementizio (la reazione non può esplicarsi in assenza del veicolo acqua).

Pertanto viene a mancare l'ambiente "passivante" e si attivano i fenomeni di ossidazione del ferro d'armatura; conseguentemente, per effetto dell'aumento volumetrico determinato dai prodotti dell'ossidazione, si ha il distacco dello strato corticale del calcestruzzo stesso.

È comunque importante una prima classificazione degli effetti delle aggressioni naturali in:

- ✚ degrado prevalente del calcestruzzo, senza influenze dirette nei confronti delle armature metalliche (attacco del sovrato);
- ✚ degrado del calcestruzzo (aumento delle fessurazioni) e dell'armatura metallica (eliminazione dell'ambiente passivante), quindi necessità di intervento su entrambi i costituenti del cemento armato (attacco dell'anidride carbonica, cloruri, ecc.).

È d'altra parte evidente che anche i fenomeni di degrado del solo calcestruzzo determinano, nel tempo, l'esposizione dell'armatura metallica all'aggressione attraverso le vie preferenziali d'ingresso, cioè le fessurazioni.

Oltre a ciò si precisa che la caratteristica prestazionale del prodotto da riparazione, come protettivo, consiste nella bassa permeabilità nei confronti dell'acqua e nella resistenza alla diffusione del vapore acqueo e dell'anidride carbonica (Tabella 64).

Ricordando che il calcestruzzo è, per propria definizione, un corpo poroso e che attraverso questo sistema di capillari e microcapillari si ha un continuo e variabile trasporto di liquidi, ogni strato di rivestimento corticale o pellicolare deve possedere caratteristiche di resistenza alla diffusione del vapore acqueo più vicine possibile a quella del calcestruzzo di supporto, così da evitare il rischio di distacco per effetto della tensione del vapore, generante tensioni sempre superiori sia alla resistenza a trazione del calcestruzzo sia di quella di adesione supporto/riporto.

Quanto sopra è da tenere in evidenza a maggior ragione quando si opera con prodotti vernicianti, con spessore di poche centinaia di micron, su strutture interrate (necessità assoluta di assicurare la preventiva formazione di una barriera a vapore o di uno strato di smorzamento interposto tra il vecchio calcestruzzo e la vernice oppure tra questa ed il riporto cementizio utilizzato per la riprofilatura).

Tra i prodotti evidenziati è possibile rilevare che una malta cementizia modificata, a fronte di un aumento limitato della resistenza alla diffusione del vapore acqueo (10 - 33 volte), presenta un considerevole miglioramento per quanto riguarda la resistenza alla diffusione della CO₂ (56 - 113 volte).

Al contrario una vernice epossidica risulta eccessivamente impermeabile al vapore d'acqua, assumendo un comportamento piuttosto scadente nei confronti dei prodotti cementizi per la riparazione, per quanto concerne l'anidride carbonica, specie in considerazione dei diversi spessori utilizzati con i due prodotti. Nel primo caso infatti, il rapporto tra la resistenza alla diffusione del vapore d'acqua e della CO₂ è pari a 3 - 5, nel secondo solamente ad 1, 2.

Prodotto	Resistenza alla diffusione						Rapporto di efficacia CO ₂ /H ₂ O
	Vapore acqueo			Anidride carbonica			
	μH ₂ O	μH ₂ O/ μH ₂ O cls	Spessore Equivalente (mm)	μCO ₂	μCO ₂ / μCO ₂ cls	Spessore Equivalente (mm)	
Calcestruzzo R _{ck} 30	30	1	40	360	1	40	1
Malta cementizia con HRWR + CSF	90	3	13,3	3.600	10	4	3,3
Malta cementizia con resine acriliche	300	10	4	20.000	56	0,72	5,6
Malta cementizia con resine acriliche + reattivi pozzolanici	1.000	33	1,2	40.000	113	0,36	3,4
Vernice epossidica	20.000	667	0,06	300.000	830	0,05	1,2
Vernice di metacrilato	3.500	117	0,34	930.000	2.580	0,02	22

Tabella 64 - Coefficienti di resistenza alla diffusione di vapore acqueo e anidride carbonica e rapporti di efficacia di prodotto per la riparazione e protezione del calcestruzzo.

Criterio basilare di scelta di un prodotto cementizio, utilizzato per la riparazione e protezione del calcestruzzo, è quindi la verifica delle sue capacità di essere impermeabile all'acqua, ma non al vapore acqueo e di assicurare un'elevata resistenza nei confronti della diffusione della anidride carbonica (riduzione del rischio di penetrazione di veicoli aggressivi e maggiore protezione nel tempo dell'armatura metallica nei confronti dell'ossidazione) e dell'ossigeno (corrosione).

Oltre alle modifiche della malta cementizia base, con l'impiego di riduttori di acqua d'alta qualità (H.R.W.R.), di resine acriliche e di reattivi pozzolanici micronizzati (fumi di silice condensati, fly-ash, loppe macinate, ecc.), ulteriore protezione è data dall'aggiunta di espansivi, al fine di ridurre il ritiro idraulico e soprattutto di inibitori di corrosione in grado di garantire il giusto ambiente nella zona attigua all'armatura e quindi di passivare il ferro.

La diagnosi e la preparazione

Come prescrizione generale della qualità del sottofondo per la garanzia dell'applicazione, è possibile richiedere che:

- ✚ la resistenza media a trazione del calcestruzzo non debba essere inferiore ad 1,5 N/mm²; non è comunque ammesso, in nessun caso scendere sotto valori di 1,0 N/mm²;
- ✚ le fessure superficiali aventi un'ampiezza fino a 0,2 mm non sono influenti e quindi non necessitano di particolari trattamenti;
- ✚ fessurazioni di dimensioni superiori devono essere stuccate con materiali adeguati, quali resine epossidiche, o sigillate con iniezioni;
- ✚ i rivestimenti applicati devono raggiungere valori di adesione media di almeno 1,0 N/mm².

La scelta del metodo di preparazione, come il conseguente sistema di riparazione e protezione, dovrebbero essere preceduti da un'attenta analisi delle condizioni dell'opera, corredata da una spiegazione dettagliata delle cause e dell'estensione dei danni. L'analisi globale del degrado può essere suddivisa nelle tre seguenti fasi:

- ✚ analisi da effettuarsi sul manufatto;
- ✚ analisi da effettuarsi in laboratorio;

✚ valutazione.

I rilevamenti sul manufatto, per un'analisi delle condizioni del degrado, sono spesso estesi e tali da richiedere una notevole mole di lavoro e possono, in determinati casi, assumere un'incidenza rilevante sul costo globale dell'intervento. I più importanti esami e misure da effettuarsi sull'opera d'arte sono:

- ✚ esame della documentazione relativa alla costruzione (progetti, calcoli statici, ecc.) quando possibile;
- ✚ perizia visiva;
- ✚ rilevamento delle fessurazioni e dei loro eventuali movimenti;
- ✚ determinazione della profondità di carbonatazione;
- ✚ misura del copriferro;
- ✚ misura del potenziale di campo (controllo non distruttivo economicamente utile nel caso di grandi opere);
- ✚ assorbimento di acqua;
- ✚ carotaggi.

Le prove di laboratorio servono, invece, a fornire conoscenze dettagliate sulle proprietà specifiche dei materiali e quindi sulle possibili cause degli ammaloramenti. Le determinazioni dei parametri prestazionali dei materiali e le analisi chimiche vengono effettuate sui campioni ottenuti per carotaggio e le principali prove di laboratorio sono:

- ✚ resistenza a compressione;
- ✚ resistenza a trazione;
- ✚ grado di saturazione delle porosità;
- ✚ coefficiente di assorbimento d'acqua;
- ✚ rapporto a/c;
- ✚ contenuto in cemento;
- ✚ contenuto di sostanze dannose (cloruri, solfati, nitriti, nitrati, ecc.).

Come conseguenza delle analisi sulla struttura e delle prove di laboratorio, nasce la valutazione e, quindi, la definizione di:

- ✚ difetti di costruzione;
- ✚ comportamento difettoso dei materiali;
- ✚ evoluzione futura dei danni.

La valutazione dello spessore del copriferro, della profondità di carbonatazione, devono essere correlate tra di loro, facilitando l'interpretazione della condizione del degrado e la scelta dei successivi interventi (Tabella 65).

Elemento strutturale	Anno di costruzione	Profondità media di carbonatazione C (mm)	Copriferro E (mm) intervallo	Copriferro E (mm) valore medio	% armatura in zona carbonatata	E/C	Rischio di corrosione
Appoggio	1969	13,9	5 – 25	14,2	50	1,02	Elevato
Testata mensola	1971	8,4	9 – 18	20,2	0	2,19	Nulla
Parapetto	1971	10,1	6 - 22	15,5	6	1,34	Basso

Tabella 65 - Analisi sul manufatto (ponte) e valutazione dell'entità del danno e sua possibile evoluzione nel tempo.

Il sottofondo in calcestruzzo deve essere comunque preparato in modo opportuno, così che ne risulti la richiesta unione tra la malta da riparazione ed il sottofondo stesso. Si procede con l'asportazione del calcestruzzo degradato utilizzando, a seconda del tipo di struttura ed ampiezza delle superfici, diverse tecniche quali:

- ✚ trattamento con getti di vapore;
- ✚ trattamento con getti di vapore e sabbia;
- ✚ sabbiatura ed idro-sabbiatura;

- ✚ idrolavaggio ad alta pressione;
- ✚ idroscarifica;
- ✚ sfiammatura e successiva pulizia meccanica;
- ✚ fresatura e successiva pulizia meccanica.

D'impiego diffuso per grandi interventi di demolizione, anche corticale, ma non usuale nella pratica della riparazione ordinaria, è l'idrodemolizione, particolarmente indicata per le superfici di ponti e viadotti in calcestruzzo (solette ed anche pareti verticali) di qualsiasi resistenza. Si effettua con l'impiego di idonee attrezzature capaci di getti d'acqua fino a pressione di uscita di 2.000/2.500 bar e con portata compresa tra 100 e 300 litri/minuto.

Questa tecnica è particolarmente vantaggiosa per la sua velocità, perchè non genera microlesioni nel calcestruzzo non demolito e prepara perfettamente le superfici e i ferri da ripristinare. Sono da preferire idrodemolitori tarabili sulla resistenza massima del supporto da demolire (per eliminare solo calcestruzzo con $R_{ck} < 25$ MPa, ecc.) e, ai fini dell'economia del lavoro, sullo spessore medio dell'asportato (perchè degradato per l'azione di cloruri o perchè da eliminare per ricostruire un copriferro carbonatato, ecc.).

Evidentemente, ogni metodo di preparazione del sottofondo ha un proprio campo di applicazione ottimale, condizionato essenzialmente dallo stato delle superfici, che si cerca di riassumere nella Tabella 66.

Ulteriore possibilità è rappresentata dall'utilizzo, per le superfici orizzontali, delle cosiddette pallinatrici, che lavorano praticamente senza formazione di polvere e sono utilizzate essenzialmente nel campo della pavimentazione industriale.

Scopo finale della preparazione, oltre a quello della necessaria pulizia del supporto, è di garantire la corretta asperità superficiale, in termini di scabrezza e regolarità. In particolare, si deve prescrivere che il sottofondo in calcestruzzo, dopo la preparazione, deve presentarsi uniformemente sano e compatto, senza tracce di lattime di cemento, vecchi rivestimenti, antievaporanti, polveri, particelle incoerenti e così via.

METODO	CONDIZIONI DELLE SUPERFICI
Getto di vapore	Oli, grassi, albumine (solubili o emulsionabili in acqua)
Getto di vapore e sabbia	Vecchie verniciature non impregnate, con buon aggrappo al sottofondo
Sabbiatura e idrosabbiatura	Asportazione di vecchie vernici in fase di distacco, impregnazioni notevoli, zone superficiali poco compatte, disgregate da cicli di gelo-disgelo o da sali disgelanti
Idroscarifica con getti d'acqua ad alta pressione (> 500 bar)	Demolizione di intonaci fessurati e in fase di distacco, asportazione del copriferro di calcestruzzo ammalorato, rivestimenti di elevato spessore in fase di distacco, demolizione del calcestruzzo
Sfiammatura e successiva pulizia meccanica	Ammaloramenti profondi, impregnazione in profondità
Fresatura e successiva pulizia meccanica	Danni provocati dal gelo e dai sali disgelanti, erosione per trasporto di solidi nell'acqua, impregnazione in profondità

Tabella 66 – Metodi di preparazione delle superfici e relativi campi di applicazione.

L'applicazione delle malte cementizie

Definito il migliore metodo e grado di preparazione del sottofondo in calcestruzzo, è compito dell'Applicatore (della D.L. per quanto riguarda il controllo dell'osservanza delle prescrizioni del fornitore) mettere in opera i prodotti scelti, in particolare facendo riferimento al sistema di applicazione, agli spessori per singola passata, alla protezione durante la fase di maturazione del riporto. È naturale la considerazione che, per interventi su grandi superfici, sia da favorire l'utilizzo di malte cementizie applicabili meccanicamente a spruzzo (sia per via umida, che per via secca), mentre per piccole superfici si debbano usare prodotti applicati a mano (spatola, cazzuola) o con piccole attrezzature meccaniche.

Nel caso di interventi su cementi armati, i ferri eventualmente messi a nudo nella fase di preparazione del calcestruzzo ammalorato, sempre da proteggere nel caso di carbonatazione o clorurazione del substrato, dovrebbero essere accuratamente sabbiati a metallo bianco (SA 2.5 secondo la norma DIN 55928, parte 4a) o almeno per mezzo di un'energica pulizia con spazzola metallica e trattati con idonei prodotti passivanti, contenenti inibitori di corrosione e legati al cemento. Se impiegati come semplici inibitori di corrosione, i prodotti sono normalmente mono-componenti o bi-componenti (nel primo il liquido utilizzato per l'idratazione è sola acqua, nel secondo è una dispersione acquosa di polimeri sintetici) e sono applicati manualmente, in due mani, con spessore di 1 mm per mano.

Qualora la funzione del prodotto sia, oltre a quella di protettivo dell'armatura, anche di ponte adesivo tra il substrato ed il riporto cementizio, si utilizzano materiali tri-componenti, della famiglia degli epossicementizi, che normalmente sono applicati a spruzzo, sia sui ferri, che su tutta la superficie del calcestruzzo.

Successivamente all'applicazione del trattamento passivante dei ferri e dell'eventuale ponte adesivo, si procede alla messa in opera dello strato di riprofilatura, con la malta cementizia o con un ciclo di malte cementizie prescelto. Nel caso di applicazioni a proiezione meccanica, ci si trova normalmente di fronte a malte mono-componenti pronte all'uso, mono o plurimodificate con riduttori d'acqua, reattivi pozzolanici micronizzati e resine sintetiche, a volte contenenti fibre sintetiche. L'applicazione deve avvenire per strati successivi (2 - 4 cm) fino al raggiungimento dello spessore finale; per spessori > 4 cm sarà indispensabile il preventivo posizionamento di una rete elettrosaldata (10 x 10), fissata al sottofondo con numero sufficiente di chiodi a sparo.

Il rivestimento risultante dall'abbinamento prodotto/sistema di proiezione a secco, consente di ottenere il miglior risultato tecnico per quanto riguarda:

- ✚ adesione al supporto;
- ✚ compattazione e quindi impermeabilità e durabilità.

D'altra parte, con questo metodo, i costi finali rispetto al procedimento per via umida risultano più elevati, in particolare per lo sfrido più elevato (20 - 25% contro il 5 - 10%).

Qualora invece siano previste applicazioni di tipo manuale, la ricostruzione del copriferro o riprofilatura del manufatto, deve essere effettuata con malte mono o bi-componenti idonee per riporti in spessore.

Si tratta di malte cementizie caratterizzate da un modulo elastico mirato, i cui strati di malta non devono superare i 20 mm di spessore cadauno; lo strato successivo deve essere applicato quando il precedente sia sufficientemente rappreso ed in grado di sopportare il nuovo peso.

Sia nel caso di applicazioni a spruzzo, che manuali, può essere prevista l'esecuzione di uno strato di regolarizzazione superficiale, per preparare la successiva applicazione di un rivestimento estetico o chimico-resistente. Come per i prodotti precedentemente analizzati, l'applicazione può essere fatta a mano o a macchina e, in ogni caso, la malta di finitura (anche con eventuale esclusiva azione turapori) viene compattata e regolarizzata con spatole metalliche dentate, per imprimere al rivestimento finale uno spessore costante ed eventualmente rifinite con frattazzo di spugna. Lo spessore della regolarizzazione è normalmente minore ai 2 mm.

Particolarmente interessanti sono le caratteristiche delle nuove malte epossicementizie tri-componenti, il cui impiego diventa indispensabile come strato di regolarizzazione quando:

- ✚ non sia stata prevista una barriera vapore e i supporti debbano essere traspiranti. Le tensioni di vapore che giungono dal sottofondo, si diffondono nelle capillarità esistenti nello spessore del rivestimento epossicementizio, disperdendosi;
- ✚ quando debba essere preparato un sottofondo non ancora stagionato, per rapide applicazioni di un prodotto verniciante. Come nell'esempio precedente, la capacità del prodotto di diffondere le tensioni del vapore, consente all'umidità del supporto sottostante di disperdersi senza ulteriori danni;
- ✚ quando si debba favorire l'adesione di prodotti epossidici, compatibili con la parte esterna della regolarizzazione, anche questa costituita essenzialmente di resina epossidica.

Per tutti i metodi di intervento indicati, il sottofondo deve essere saturato di acqua a rifiuto e lo strato di riporto maturato in condizioni ottimali, attraverso l'impiego di teli umidi o meglio di specifici prodotti curing-compound non compromettenti per le eventuali successive applicazioni.

Conclusioni

Oggigiorno le opere in calcestruzzo semplice od armato sono soggette a molteplici sollecitazioni ed azioni di vario tipo. Ponti e viadotti sono danneggiati dall'intenso impiego di sali disgelanti durante il periodo invernale, aggressione accentuata dal fatto che molte strutture sono state costruite senza prevedere alcuna impermeabilizzazione. Gallerie ed opere nel sottosuolo sono degradate dal contatto con acqua solfatiche e dall'azione dei prodotti della combustione dei veicoli a motore; più genericamente le strutture civili ed industriali che vivono nelle grandi città o in presenza di concentrazioni industriali, sono soggette alla carbonatazione.

I difetti costruttivi più frequenti e più gravi restano, comunque, l'insufficiente spessore del copriferro e la qualità scadente del calcestruzzo impiegato.

I materiali usati per eseguire la riparazione del calcestruzzo, hanno avuto un rapidissimo sviluppo nel corso degli ultimi due decenni.

Partendo, negli anni '60, dal concepimento delle malte premiscelate, si passò alle malte spatolabili predosate bicomponenti, modificate con resine sintetiche e, negli anni successivi, la protezione anticorrosione dei ferri venne assicurata da prodotti a base cementizia, compatibili con il successivo riporto.

I parametri che condizionano la scelta del prodotto cementizio da utilizzare, restano comunque quelli già elencati e di seguito riportati:

- ✚ resistenza alla flessotrazione;
- ✚ elevato coefficiente di resistenza alla diffusione della anidride carbonica;
- ✚ buon coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore d'acqua;
- ✚ ridotto assorbimento d'acqua (impermeabilità);
- ✚ modulo d'elasticità idoneo (anche a - 20°C);
- ✚ resistenza all'alternanza dei cicli di gelo-disgelo;
- ✚ ottima applicabilità, secondo il sistema previsto (manuale o meccanico);
- ✚ chiare indicazioni del produttore per il confezionamento e l'applicazione.

Basilare si può definire la diagnosi preventiva del danno, come elemento decisionale per il committente nei termini qui di seguito riportati:

- ✚ la conoscenza globale dello stato di un'opera costituisce la base per proposte di risanamento mirate ed adeguate al tipo di danno;
- ✚ la tempestiva previsione dei difetti, mediante prove, permette l'adozione di misure preventive e protettive, tese ad impedire che si possano verificare danni alla costruzione;
- ✚ le ispezioni regolari all'opera rappresentano un importante contributo alla definizione di piani di investimento a lungo termine, per la conservazione del manufatto.

Si conclude con un'affermazione, che è anche un invito nei confronti di tutti coloro che operano nel difficile campo della manutenzione. Ci sono due tipi di persone, gli interpreti, che trattano il calcestruzzo, ovvero quelli che lo progettano e quelli che lo fanno! E poi altre persone, al di fuori: quelle che lo ammirano, quelle che lo denigrano, quelle, tante, senza opinione.

È per queste ultime che i due "interpreti" lavorano ma purtroppo accade anche a loro, troppo spesso, di ignorare gli aspetti tecnologici e prestazionali del calcestruzzo o, ancora più grave, di ignorarsi. Per questa ragione, è necessario che gli Addetti al "mestiere" pongano più attenzione a come operare, quando operare, a quale costo operare, utilizzando tutta la collaborazione di chi vede il mercato non solo come elemento per il conseguimento dei propri fini istituzionali (dare utile alle aziende), ma anche come espressione della propria immagine di affidabilità.

Come dice Adam M. Neville, solo stabilendo un rapporto certo tra causa ed effetto, il calcestruzzo probabilmente potrà:

- ✚ essere messo correttamente in opera;
- ✚ raggiungere la maturità senza difficoltà;
- ✚ invecchiare e vivere il tempo utile progettato, senza necessità di costosi interventi correttivi e manutentivi.

Esempio di prescrizioni di capitolato

Le prescrizioni che seguono si riferiscono a riparazioni superficiali di elementi di calcestruzzo rigidi o poco deformabili (riprofilatura e/o ricostruzione del copriferro di elementi strutturali non sollecitati o prevalentemente compressi).

Voce generale: il Fornitore dovrà comprovare di operare in regime di Assicurazione di Qualità, fornendo gli estremi della relativa certificazione.

Riparazioni superficiali di elementi di calcestruzzo rigidi.

1. Demolizione di ogni parte in distacco non dotata di sufficiente resistenza e coesione, operando con mezzi manuali, o comunque tali da non danneggiare lo strato di calcestruzzo sottostante ed evitando eccessive vibrazioni. Le armature in avanzato stato di degrado, saranno scoperte rimuovendo completamente lo strato di calcestruzzo di copriferro. Verranno rimosse le tracce di precedenti interventi di riparazione o i riporti non perfettamente aderenti.
2. Pulizia, mediante spazzolatura o sabbiatura, di tutte le superfici interessate dai successivi trattamenti, con completa rimozione di sostanze e depositi estranei (ruggine, olio, grassi, pellicole superficiali sfarinanti). I ferri d'armatura, dopo essere stati ripuliti asportando completamente la ruggine, saranno trattati mediante applicazione a pennello, in due mani a distanza di circa 3 ore una dall'altra, di una biacca cementizia pennellabile a due componenti a base di leganti idraulici, polveri silicee, inibitori di corrosione in dispersione di polimeri acrilici.
3. I riporti in spessore a ricostruzione del copriferro e delle parti mancanti, verranno realizzati, in alternativa:
 - nel caso di spessori limitati, mediante riporto diretto di malta pronta monocomponente a ritiro controllato, tixotropica, a base di cementi modificati con polimeri sintetici e microsilice, aggregati selezionati fino a 2 mm, microfibre ed additivi. L'applicazione sarà eseguita a dorso di cazzuola o con spatola e spessore massimo di 20 mm per passata, curando di bagnare a rifiuto il sottofondo prima dell'applicazione;
 - nel caso di elevati spessori, mediante colatura entro cassero, di malta pronta monocomponente a ritiro controllato, a base di cementi modificati con polimeri sintetici e microsilice, aggregati selezionati fino a 2 mm e additivi. Le superfici riparate, verranno successivamente regolarizzate con applicazione di malta pronta adesiva monocomponente a ritiro controllato, tixotropica, a base di cementi modificati con polimeri sintetici e microsilice, aggregati selezionati fino a 2 mm, microfibre ed additivi. L'applicazione sarà eseguita a spatola su sottofondo bagnato a rifiuto e successivamente finita con frattazzino di spugna.
4. Per la protezione delle superfici riparate e dell'intera struttura dalla carbonatazione, verrà applicata una vernice protettiva e decorativa a base di resine acriliche in solvente, traspirante al passaggio del vapore ma impermeabile all'acqua e all'anidride carbonica. Il trattamento sarà applicato su sottofondo pulito e asciutto, mediante pennello, rullo o spruzzo, in almeno due mani. In alternativa, nel caso di sottofondo leggermente umido, verrà impiegata una vernice protettiva e decorativa a base di resine acriliche in dispersione d'acqua, applicata mediante pennello, rullo o spruzzo, in almeno due mani.

NOTE SUL CALCESTRUZZO OGGI

Indice degli argomenti

PREFAZIONE A CURA DI FILIBERTO FINZI

INTRODUZIONE (pagg. 1 ÷ 3)

Capitolo I – IL CALCESTRUZZO: LA STORIA E LE PRESTAZIONI (pagg. 4 ÷ 10)

- Il proto-calcestruzzo e le piramidi egizie – I leganti artificiali primitivi ed il neo calcestruzzo – I romani ed il calcestruzzo: i primi leganti idraulici – I primi cementi moderni – Il calcestruzzo oggi – Il calcestruzzo e le sue proprietà (Lavorabilità – Resistenze – Durabilità – Permeabilità - Variazioni di volume - Deformazione plastica ed estensibilità - Proprietà termiche).

Capitolo II - IL CEMENTO (pagg. 11 ÷ 21)

- Generalità (composizione e produzione) - L'idratazione del cemento - Presa ed indurimento della pasta cementizia - Calore di idratazione - Il ritiro igrometrico.

Capitolo III – Gli aggregati (pagg. 22 ÷ 32)

- Le sabbie – Le ghiaie ed i pietrischi – Proprietà – Stato delle superfici – Gelività – Densità apparente – Peso litrico e volumetrico – Costituzione mineralogica – Forma dei granuli – Granulometria – Percentuali dei vuoti nell'aggregato – Superficie specifica degli aggregati – Contenuto di sostanze fini, limo – argillose e di impurità organiche.

Capitolo IV – L'acqua d'impasto (pagg. 33 ÷ 34)

- Caratteristiche

Capitolo V – Additivi ed aggiunte per il calcestruzzo (pagg. 35 ÷ 64)

- Definizioni – Additivi per calcestruzzo – Additivi fluidificanti e superfluidificanti – Additivi aeranti – Additivi ritardanti – Additivi acceleranti – Additivi antigelo – Le aggiunte per il calcestruzzo – La cenere volante – La loppa finemente macinata – Il fumo di silice – I fumi di silice nella protezione delle nuove strutture in c.a. soggette all'aggressione dell'anidride carbonica – La reazione pozzolanica e le prestazioni del calcestruzzo – Permeabilità all'acqua con i fumi di silice – Altissime resistenze meccaniche.

Capitolo VI – Il mix granulometrico (pagg. 65 ÷ 74)

- Granulometria dell'aggregato misto – Curva di Füller – Curva di Bolomey – Curva cubica – Curva di Faury – Metodi diversi.

Capitolo VII – Il proporzionamento dell'impasto di calcestruzzo (pagg. 75 ÷ 85)

- Il proporzionamento – Metodo anglosassone – Metodo americano del rapporto a/c o di Abrams – Metodo tedesco.

Capitolo VIII – Lavorazioni e controlli sul calcestruzzo fresco (pagg. 86 ÷ 95)

- Mescolamento dell'impasto di calcestruzzo – Trasporto del calcestruzzo – Messa in opera del calcestruzzo – Controlli sul calcestruzzo allo stato fresco – Determinazione della consistenza del calcestruzzo - Metodo del tavolo a scosse – Metodo della consistenza VE-BE o metodo svedese – Determinazione del peso specifico del calcestruzzo fresco – Determinazione del dosaggio effettivo e resa volumetrica – Determinazione del contenuto di aria inglobata – Determinazione della temperatura dell'impasto – Determinazione dei tempi di inizio e fine presa del calcestruzzo – Determinazione dell'acqua d'impasto essudata.

Capitolo IX – Le deformazioni del calcestruzzo (pagg. 96 ÷ 103)

- Il ritiro – Deformazione elastica – Deformazione plastica.

Capitolo X – Proprietà del calcestruzzo indurito (pagg. 104 ÷ 122)

- Permeabilità all'acqua – Durabilità – Cause del degrado del calcestruzzo – Resistenze meccaniche del calcestruzzo – Resistenza a compressione.

Capitolo XI – Pompaggio, compattazione e stagionatura protetta del calcestruzzo (pagg. 123 ÷ 142)

- Il pompaggio del calcestruzzo – La compattazione del calcestruzzo per effetto della vibrazione meccanica – La stagionatura protetta.

Capitolo XII – Il calcestruzzo proiettato (pagg. 143 ÷ 156)

- Introduzione all'underground – Il calcestruzzo proiettato – Il calcestruzzo proiettato per via umida – La tecnologia dell'additivazione – Il mix design del calcestruzzo proiettato per via umida – Esempio di mix design.

Capitolo XIII – Il sistema normativo europeo ed i riflessi in Italia (pagg. 157 ÷ 166)

- La dispersione dei valori e la resistenza caratteristica del calcestruzzo – Il sistema normativo europeo – La norma UNI EN 206-1.

Capitolo XIV – Le malte cementizie per la riparazione del calcestruzzo: criteri di scelta (pagg. 167 ÷ 176)

- La manutenzione di un'opera in calcestruzzo – Criteri di scelta delle malte cementizie – La diagnosi e la preparazione – L'applicazione delle malte cementizie – Conclusioni – Esempio di prescrizioni di capitolato.