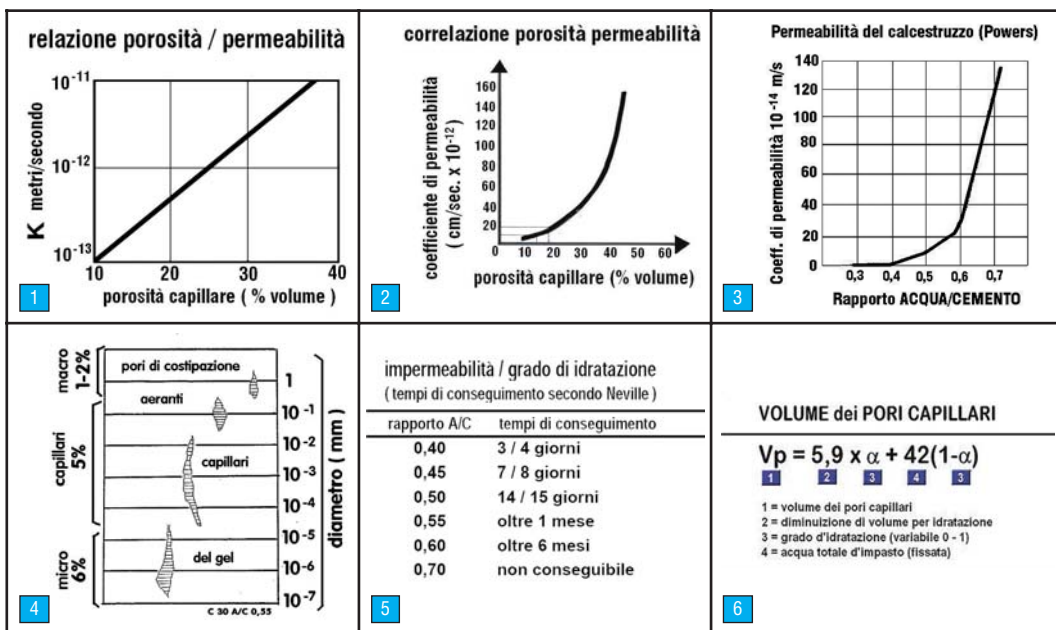


1.0 PERMEABILITÀ ED IMPERMEABILITÀ

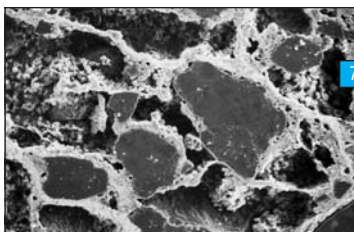
In linea generale la permeabilità è la proprietà dei materiali di consentire il passaggio di fluidi (liquidi, nel caso in esame), senza alterare la propria struttura. Si definiscono permeabili i materiali che permettono il passaggio di quantità relativamente elevate di liquido, mentre sono impermeabili quei materiali attraverso i quali il flusso di liquido è trascurabile. La rapidità con cui un fluido attraversa un corpo solido dipende dal tipo di sostanza che costituisce il corpo, dalla pressione del fluido e dalla temperatura. Per essere permeabile, un materiale deve essere poroso, ossia deve possedere spazi vuoti, i pori, capaci di assorbire liquido. I pori, inoltre, devono essere collegati da una rete di interstizi, che permetta al fluido di attraversare la sostanza solida. Per essere impermeabile, al contrario, un materiale deve possedere una struttura densa e compatta, esente da interstizi comunicanti fra loro.

2.0 PERMEABILITÀ ED IMPERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO

L'impermeabilità del calcestruzzo è una delle prerogative essenziali per la durabilità delle strutture nel tempo. Il conglomerato cementizio, o pietra cementizia, è assimilabile per natura ad una pietra naturale compatta per cui l'impermeabilità all'acqua di



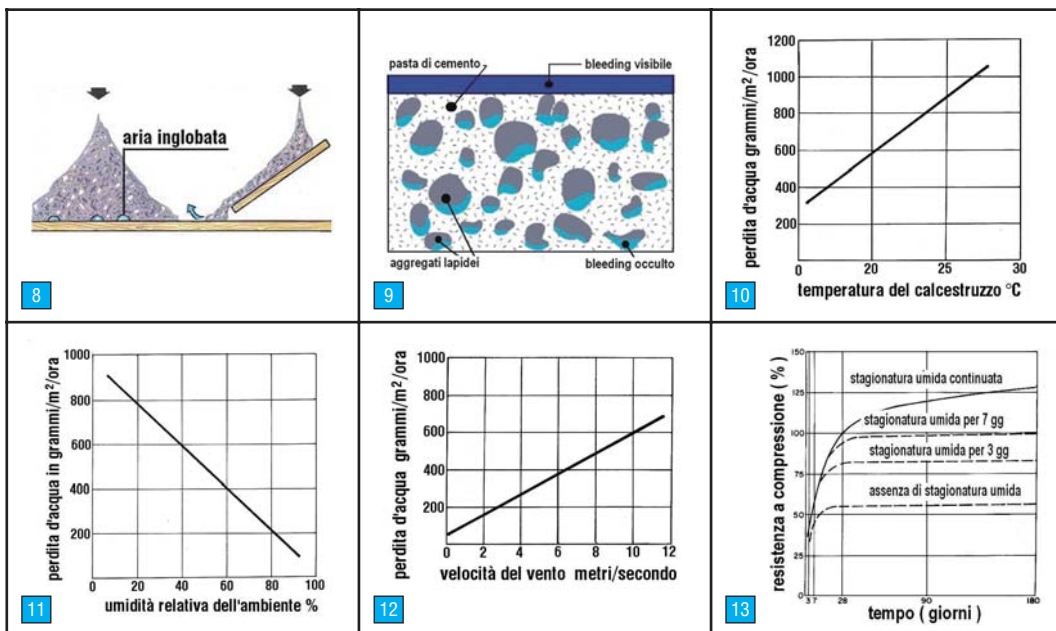
un marmo compatto, per esempio, corrisponde a quella di un calcestruzzo con rapporto A/C = 0,48. L'acqua introdotta nell'impasto di calcestruzzo, per l'idratazione e per la lavorabilità richiesta dalla messa in opera, lascia nella matrice del calcestruzzo, dopo maturazione, una rete di fitti cunicoli determinando una porosità della pasta cementizia, costituita dai pori del gel e dai pori capillari. (Figura 4). La "porosità capillare", che governa in larga misura la permeabilità "intrinseca" del conglomerato, dipende dal rapporto acqua/cemento (Figura 3), e dal grado di idratazione (Figura 5) e può variare da "0" sino al 40% in volume, rispetto al volume della pasta cementizia. Con un rapporto acqua/cemento superiore a 0,38, la permanenza di pori capillari, anche dopo la completa idratazione, salvo specifici interventi attraverso l'apporto di "filler reattivi" è praticamente ineludibile. I pori capillari non sono visibili se non con il microscopio elettronico, il loro diametro è dell'ordine del micron (tra 0,1



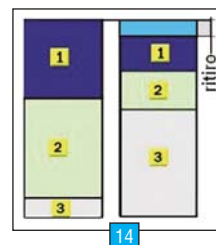
calcestruzzo: porosità (influenza sui processi di degrado)

Tipo	Dimensioni	Effetti
POROSITÀ DEL GEL	1/100μ (circa)	non consente la motilità dei liquidi
POROSITÀ CAPILLARE	qualche μ	degradazione lenta
POROSITÀ INTERSTIZIALE	decimi di mm	degradazione medio/veloce
MICROFESSURE	decimi di mm	degradazione medio/veloce
MACROFESSURE	millimetro	degradazione rapida

e 10 micron), sono di struttura variabile e formano una canalizzazione continua interconnessa nell'ambito della matrice; la permeabilità del calcestruzzo, quindi, non è una semplice funzione della sua porosità ma dipende anche dalla dimensione, dalla distribuzione, dalla fisicità e continuità dei pori. La formula empirica a lato (Figura 6) fornisce indicazioni per valutare l'entità volumetrica dei pori capillari in funzione del grado di idratazione e dell'acqua totale di impasto fissata. La Figura 7 elenca le differenti porosità del calcestruzzo e la loro relativa influenza sui più comuni processi di degrado del conglomerato cementizio. A titolo di esempio, la "porosità del gel", allocata dentro le particelle solide che formano la pasta di cemento, ammontante sino al 28% del volume occupato dalle particelle stesse e di dimensioni indicativamente pari ad 1/100 di micron, non consentendo la "motilità" dei liquidi, è assolutamente ininfluyente. Alla porosità capillare si aggiunge, in genere, in termini di interconnessione dei pori, la diffusissima presenza di "aria inglobata, o intrappolata" nel calcestruzzo fresco, che dovrebbe essere espulsa da una corretta compattazione del conglomerato e che crea macrovuoti (da circa 1 mm. a qualche decina di mm). Una ulteriore variabile, capace di incrementare tanto la porosità quanto l'interconnessione dei pori, è riscontrabile nella "zona di transizione" cioè quella parte della pasta cementizia (spessa qualche micron o decina di micron) che si trova a diretto contatto con l'aggregato lapideo; la zona di transizione può risultare significativamente più porosa della matrice cementizia adiacen-



te in funzione dell'acqua di "bleeding" (raccolta di acqua sulla superficie del calcestruzzo) che, durante la risalita, rimane parzialmente intrappolata sotto gli aggregati lapidei più grossi. La maggiore o minore presenza di vuoti (capillari) intercomunicanti tra le superfici di getto opposte, "porosità continua", tra cui possa verificarsi, per differenza di pressione idrostatica, un flusso di acqua, rappresenta la "permeabilità" di un calcestruzzo e, come già accennato, dipende tanto dalle caratteristiche del calcestruzzo stesso quanto dalla correttezza, o meno, dei magisteri di messa in opera, di cura e stagionatura umida (Figura 10, 11, 12 e 13) oltreché dall'eventuale insorgere di manifestazioni di micro e macrofessure da ritiro plastico ed igroscopico (Figura 14). Durante il processo di indurimento del calcestruzzo eventi climatici come la temperatura (Figura 10), l'umidità relativa (Figura 11) e la ventilazione (Figura 12) possono determinare la perdita, più o meno repentina, dell'acqua d'impasto. In mancanza di adeguati provvedimenti di cura e stagionatura umida possono verificarsi significativi scadimenti qualitativi coinvolgenti anche la permeabilità. La figura 13 evidenzia le differenze qualitative e prestazionali fra campioni dello stesso calcestruzzo sottoposti, o meno, a stagionatura umida. Le grandezze in gioco possono raggiungere valori dell'ordine del 50%. La dimensione volumetrica del ritiro plastico ed igroscopico, esemplificata nella figura 14, lascia facilmente comprendere come le tensioni che ne derivano possano tradursi in micro e macrofessure di estremo pregiudizio per una conveniente impermeabilità del calcestruzzo. Nella figura in questione, sul lato sinistro, è rappresentata la condizione del calcestruzzo all'inizio dell'indurimento; sul lato destro è rappresentata, invece, la condizione del calcestruzzo dopo l'indurimento. Il numero (1) definisce l'evoluzione volumetrica dell'acqua d'impasto, il numero (2) quella del cemento, il numero (3), quella del cemento idratato.



3.0 PERMEABILITÀ E NORMATIVA

La norma più recente in ordine al calcestruzzo: UNI EN 206-1:2001, accenna solo di passaggio alla permeabilità (5.5.3) come "Resistenza alla penetrazione dell'acqua", senza definirne parametri e limiti. La norma UNI 9858 "Calcestruzzo: Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità" riporta i valori richiamati nella tabella di seguito riportata.

UNI 9858

CALCESTRUZZO: Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità

CALCESTRUZZO IMPERMEABILE: RESISTENZA ALLA PENETRAZIONE DELL'ACQUA 7.3.1.5

Si considera adatta alla confezione di calcestruzzo impermeabile quella miscela la cui resistenza alla penetrazione dell'acqua, determinata secondo UNI 7699, dà come risultato un valore massimo minore di 50 mm e valori medi di penetrazione minori di 20 mm. Il rapporto a/c non deve superare 0,55.

Il Decreto Ministeriale 14 Settembre 2005: "Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)" affronta la tematica della durabilità strutturale e, di conseguenza anche gli aspetti inerenti la "permeabilità" del calcestruzzo ed ascrive al progettista, che deve precisare, di concerto con il committente, la durata prescritta per la struttura, in funzione di 2 classi principali: Classe 1, per durata sino a 50 anni, Classe 2, per durata sino a 100 anni.

Nello stesso decreto, inoltre, si rimette al progettista la responsabilità di stabilire e prescrivere nel progetto, le modalità di getto, compattazione e maturazione del calcestruzzo prescelto.

4.0 CONSEGUIRE L'IMPERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO

Così come accennato, la permeabilità del calcestruzzo è in stretta relazione con la microstruttura porosa del cemento indurito, a sua volta in stretta relazione con il rapporto acqua/cemento. Ne consegue che il calcestruzzo può avere diversi gradi d'impermeabilità, a seconda di come viene confezionato e posto in opera. I fattori che influiscono su questa caratteristica sono gli stessi che determinano le altre proprietà: composizione, lavorazione e trattamenti successivi. In linea teorica non vi sono particolari difficoltà per ottenere un calcestruzzo impermeabile, più pragmaticamente, è bene considerare che il calcestruzzo "realmente" impermeabile, richiede sforzi ed attenzioni differenti dalle normali abitudini di cantiere. Sul piano tecnico-progettuale è indispensabile considerare che questa impermeabilità deve ritenersi relativa e non assoluta. Per ottenere un calcestruzzo impermeabile sono infatti indispensabili un'accurata progettazione, una attenta confezione, un'adeguata messa in opera, senza dimenticare l'indispensabile trattamento di cura e stagionatura, che deve essere effettivo ed efficace, al contrario di procedure del tutto apparenti che "spesso" sono adottate in molti cantieri. In termini pratici, è necessario anzitutto ridurre il rapporto acqua/cemento al minimo compatibile con un'adeguata lavorabilità; si debbono usare aggregati di adatta natura e granulometria; bisogna impedire un troppo rapido prosciugamento dei getti per evitare la formazione di screpolature esterne e interne dovute al ritiro; durante il getto bisogna evitare la sedimentazione del calcestruzzo, impedire cioè che esso perda quella omogeneità che si è ottenuta con il mescolamento. Poiché, con rapporti acqua/cemento superiori a 0,38, è praticamente inevitabile il permanere di quantità non trascurabili di pori capillari, anche dopo la completa idratazione, specifici interventi, attraverso l'apporto di "filler reattivi" possono risultare ineludibili.

5.0 MATERIALI INNOVATIVI E NORMA UNI EN 206-1:2001

La norma UNI EN 206-1:2001 Calcestruzzo, specificazione, prestazioni, produzione e conformità" introduce, al punto 3.1.23, il concetto di "aggiunta", definita come materiale finemente suddiviso usato nel calcestruzzo allo scopo di migliorare certe proprietà o di ottenere proprietà speciali. La presente norma considera due tipi di aggiunte inorganiche: le aggiunte praticamente inerti (tipo I) e le aggiunte pozzolaniche o ad attività idraulica latente (tipo II).

Al punto 5.2.1, della stessa norma viene altresì inserito il concetto del valore K (da non confondersi con l'omonimo parametro di permeabilità). Il concetto K riferito alle aggiunte, consente che le aggiunte di tipo II vengano prese in considerazione sostituendo al termine "rapporto acqua/cemento" (definito in 3.1.31) con il termine "rapporto acqua/cemento + k aggiunta, nel requisito del dosaggio minimo di cemento (vedere 5.3.2). L'effettivo valore di k dipende dalla specifica aggiunta. Per le "aggiunte pozzolaniche" (assimilabili a MICROPLUS), al punto 5.2.3, si precisa che la quantità massima di fumi di silice o di aggiunte assimilabili, che può essere considerata agli effetti della rivalutazione del rapporto acqua/cemento e del contenuto di cemento, può essere desunta sulla base dei seguenti parametri:

- per un rapporto acqua/cemento prescritto $\leq 0,45$ $k = 2,0$
- per un rapporto acqua/cemento prescritto $> 0,45$ $k = 2,0$ eccetto
- per le classi di esposizione XC e XF, per un rapporto acqua/cemento prescritto $> 0,45$. $k = 1,0$

La disponibilità di "specialità" ad elevato contenuto tecnologico, come le "aggiunte pozzolaniche", viene quindi riconosciuta come opportunità tecnologicamente e terotecnologicamente adeguata per costruire opere impermeabili attraverso l'uso combinato di "calcestruzzi intrinsecamente impermeabili", presidi specifici, e tecniche realizzative adeguate.

6.0 MISURE DI PERMEABILITÀ

Il coefficiente di permeabilità K (in metri per secondi) secondo la legge di Darcy, nata per le rocce, è il parametro che esprime compiutamente anche la permeabilità del calcestruzzo indicando, con la velocità unitaria dell'acqua, l'entità del passaggio della stessa attraverso il calcestruzzo. Nel caso di rapporti acqua/cemento elevati (superiori a 0,7), il coefficiente di permeabilità è dell'ordine di 10^{-10} m/s, valore rappresentativo di un calcestruzzo ad alta permeabilità. Per valori di rapporto acqua/cemento

più favorevoli (inferiori a 0,40), il coefficiente conseguibile, con opportuni apporti di filler reattivi di tipo pozzolanico e di agenti superlubrificanti in grado di fornire la necessaria consistenza nell'ambito dei valori di rapporto acqua/cemento considerati, può essere dell'ordine di 10^{-11} m/s, o inferiore. Tenendo conto delle variabili accennate e della complessità operativa, viene in genere assunto, come valore di progettazione:

$$K = 1 \times 10^{-11}$$

coefficiente K di permeabilità (Darcy)

- La legge di Darcy vale per fluidi newtoniani
Il coefficiente di filtrazione dipende dalla viscosità e dal peso specifico del fluido
- Si può introdurre il coefficiente di permeabilità intrinseca, k

$$K = \frac{Q \times L}{A \times H}$$

- Il coefficiente di permeabilità intrinseca è funzione solo delle caratteristiche del mezzo poroso

K = Coefficiente di permeabilità (cm/sec)
 Q = Flusso di acqua attraverso il campione (cm³/sec)
 L = Spessore del campione attraversato dal flusso (cm)
 A = Sezione del campione (cm²)
 H = Battente idraulico (cm)

Bibliografia

Luigi Massidda: "Analisi delle cause di degrado del calcestruzzo e delle opere in cemento armato".
 Adam M. Neville: "Properties of Concrete".
 T.C. Powers: "The Physical Structure of Portland Cement Paste".
 Mario Collepardi: "Z come zona di transizione".
 NRMCA: "Concrete in Practice".
 ACI: "Manual of Concrete Practices".

