

PERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO: TEORIA, PRATICA E PRESCRIZIONI DI CAPITOLATO

MARIO COLLEPARDI (*), LUIGI COPPOLA (*)

1. INTRODUZIONE

La permeabilità è una caratteristica molto importante in tutte le opere in calcestruzzo: in particolare, per le opere idrauliche si richiede, ovviamente, che il calcestruzzo risulti "impermeabile" all'acqua; più in generale, in tutte le opere in calcestruzzo l'eccessiva permeabilità all'acqua è sinonimo di scarsa durabilità, poiché con l'acqua penetrano nel calcestruzzo anche i potenziali agenti aggressivi (solfati, cloruri, alcali, ecc.) ed inoltre si creano le condizioni di degrado del materiale a causa della formazione di ghiaccio nei climi freddi [1, 2].

A fronte dell'importanza del problema, molto spesso - anche in lavori di opere idrauliche di rilevante impegno - la "impermeabilità" del calcestruzzo, pur esplicitamente (ma genericamente) richiesta nel capitolato, non viene quantificata con un valore, né se ne precisa il metodo di misura. E' ovvio che pretendere una caratteristica (in questo caso la "impermeabilità") senza definire il metodo di misura, e quindi senza quantificare il valore richiesto, equivale in sostanza a creare le premesse per evadere la richiesta con grave danno per il committente. Inoltre, in caso di contestazioni è difficile valutare l'eventuale "impermeabilità" in mancanza di una sua quantificazione in capitolato.

Lo scopo di questo articolo è quello di fornire alcune semplici e pratiche raccomandazioni per la produzione di opere in calcestruzzo impermeabile. Dopo aver descritto i metodi con i quali è possibile misurare la permeabilità ed aver esaminato alcuni aspetti teorici sulla correlazione porosità-permeabilità della matrice cementizia, verranno presi in considerazione alcuni aspetti pratici riguardanti la prescrizione dei materiali e delle operazioni da eseguire sul cantiere. In sostanza con questo articolo si vuole rispondere ai seguenti quesiti:

- come si può misurare la permeabilità?
- qual'è un valore accettabile di permeabilità?
- come può essere prescritta la permeabilità?
- come può essere controllata la permeabilità?

2. MISURA DELLA PERMEABILITÀ ALL'ACQUA

La misura della permeabilità del calcestruzzo all'acqua viene effettuata in laboratorio fondamentalmente con due metodi: nel primo si misura il coefficiente di permeabilità, nel secondo lo spessore di calcestruzzo penetrato dall'acqua in corrispondenza di una determinata pressione.

Il coefficiente di permeabilità (K) è calcolato attraverso l'equazione di Darcy:

$$(dV/dt) (1/A) = K(dh/l) \quad (1)$$

dove dV/dt è il flusso dell'acqua (in m^3/s) misurato su un provino di sezione A (in m^2) e di spessore l (in m), e dh è la pressione dell'acqua espressa in metri di colonna d'acqua.

Le superfici del provino parallele alla direzione del flusso sono sigillate cosicché l'acqua può percolare solo lungo lo spessore l attraverso la superficie (A) ortogonale al flusso. Misurando il volume di acqua percolata in un determinato tempo (dV/dt) e conoscendo le dimensioni del provino (A ed l) oltre che la pressione applicata (dh) si può calcolare il coefficiente di permeabilità (K):

$$K = (dV/dt) (1/A) (l/dh) \quad (2)$$

In realtà, poiché con i normali strumenti di laboratorio è difficile applicare una pressione maggiore di 20 atm (corrispondente a circa 200 m di colonna d'acqua), e poiché le dimensioni del provino di calcestruzzo (di laboratorio e carotato) debbono rientrare entro certi limiti, è difficile misurare valori di K inferiori a $1 \cdot 10^{-12}$ m/s: per tali valori di K, infatti, il flusso di acqua permeata è trascurabile e talvolta inferiore alla velocità con cui l'acqua percolata evapora dal recipiente di raccolta.

In queste condizioni è preferibile adottare il metodo di misura alternativo che consiste nel misurare lo spessore di calcestruzzo penetrato dall'acqua sotto una certa pressione in un determinato tempo. Questa prova, descritta dalla procedura DIN [3], è raccomandata tanto dalle norme nazionali [4] quanto da quelle europee [5]. La prova viene effettuata su un provino di calcestruzzo (20 cm x 20 cm x 12 cm) stagionato a 20°C in ambiente saturo di umidità per 28 giorni. Si applica una pressione di 1 atm per 2 giorni, di 3 atm per 1 giorno e di 7 atm per 1 giorno. Quindi si seziona il calcestruzzo in una direzione parallela al flusso di acqua e si misura lo spessore di calcestruzzo bagnato dall'acqua.

3. LIMITI DI ACCETTABILITÀ

Soprattutto nelle opere idrauliche, ma spesso anche ai fini della durabilità, i valori massimi di K ritenuti accettabili variano da $0,5 \cdot 10^{-11}$ m/s [6] a $1,5 \cdot 10^{-11}$ m/s [7]. Se si assume come accettabile un valore massimo di K intermedio tra i due ora menzionati ($1 \cdot 10^{-11}$ m/s), si può valutare quale sia, per esempio, il flusso di acqua attraverso $1 m^2$ di una struttura in calcestruzzo (spessore 20 cm) sottoposta permanentemente ad una pressione pari a 60 m di colonna d'acqua:

$$\begin{aligned} dh &= 60 \text{ m} \\ A &= 1 \text{ m}^2 \\ l &= 0,2 \text{ m} \\ K &= 1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$(dV/dt) = k \cdot A \cdot (dh/l) = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 1 \cdot (60/0,2) = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s} = 10,8 \text{ cm}^3/\text{ora}$$

(*) Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

Una portata di 10,8 cm³ di acqua per m² di struttura per ora è decisamente inferiore alla velocità con cui l'acqua evapora da una superficie bagnata (circa 200 cm³/(m² · ora) a 20°C con UR del 70% e con una velocità del vento di 8 km/ora). Da ciò consegue che il flusso di acqua sopra calcolato (10,8 cm³/ora) non riuscirà assolutamente a inumidire la parete opposta a quella sottoposta alla pressione dell'acqua, a causa della immediata evaporazione dell'acqua stessa. In sostanza con un coefficiente di permeabilità non superiore a 1 · 10⁻¹¹ m/s, le costruzioni in calcestruzzo con spessore di 20 cm risultano di fatto "impermeabili" anche sotto una pressione pari ad una colonna d'acqua di 60 m.

Da prove comparative effettuate con i due metodi si è trovato che un calcestruzzo con un coefficiente di permeabilità di 1 · 10⁻¹¹ m/s corrisponde ad una penetrazione d'acqua (secondo il metodo DIN 1048) di circa 20 mm: pertanto questo valore di penetrazione dell'acqua può essere considerato come limite di accettabilità qualora si controlli la permeabilità di un conglomerato secondo il metodo DIN.

4. CONSIDERAZIONI TEORICHE

Le permeabilità, pur essendo una grandezza distinta dalla porosità (intesa come frazione di volume dei vuoti rispetto al volume totale) è tuttavia con essa correlabile (Fig. 1). Infatti, per materiali molto porosi e tali che i pori siano tra loro connessi, all'aumentare della porosità aumenta anche la permeabilità. Il calcestruzzo è un materiale composito costituito da elementi lapidei (inerti) generalmente molto meno porosi della matrice (pasta cementizia) nella quale sono dispersi: pertanto, il percolamento di acqua attraverso il calcestruzzo è governato dalla permeabilità della matrice cementizia. In realtà la permeabilità del calcestruzzo risulta essere maggiore della porosità della matrice cementizia giacchè all'interfaccia matrice-aggregato ("aureola") si creano condizioni meno favorevoli all'ottenimento di una pasta compatta e densificata come nelle zone più lontane dall'aureola [8]. Ciò nonostante, rimane il fatto che la permeabilità del calcestruzzo è controllata dai fattori che determinano la microstruttura dell'elemento più poroso, cioè la pasta cementizia. Inoltre, mentre la porosità e la permeabilità degli elementi lapidei sono costanti nel tempo, la porosità e la permeabilità della pasta cementizia diminuiscono con il progredire dell'idratazione del cemento. Da ciò consegue che la permeabilità del calcestruzzo, al pari di tutte le altre caratteristiche di questo materiale, varia con il tempo di stagionatura e più esattamente diminuisce con esso, purchè il calcestruzzo sia stagionato in ambiente umido.

All'aumentare del grado di idratazione (*a*) del cemento (inteso come frazione di cemento idratato rispetto a quello iniziale), la porosità della pasta di cemento diminuisce come è mostrato in Fig. 2; inoltre, a parità di grado di idratazione (cioè a parità

di tempo di stagionatura) la porosità della matrice cementizia è tanto minore quanto più basso è il rapporto acqua/cemento (*a/c*) dell'impasto. In sostanza, la porosità della matrice cementizia dipende dal grado di idratazione e dal rapporto *a/c* come è mostrato nell'equazione di Powers [9]:

$$V = 100 a/c - 36,15 a \quad [2]$$

dove *V* è il volume di pori (in litri) per ogni 100 kg di cemento. Dall'equazione di Powers si evince che, se si vuole ridurre la porosità della matrice cementizia (e quindi la permeabilità del calcestruzzo), occorre agire in una delle seguenti direzioni o in entrambe: produrre calcestruzzi con basso rapporto *a/c* e stagionare a umido il calcestruzzo per aumentare il grado di idratazione *a*.

È anche evidente dalla Fig. 2 che quanto più basso è il rap-

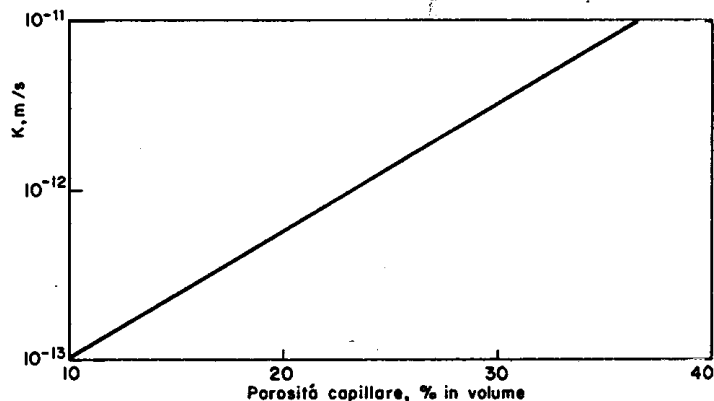


Fig. 1 - Correlazione tra coefficiente di permeabilità (*K*) e porosità capillare di una pasta di cemento.

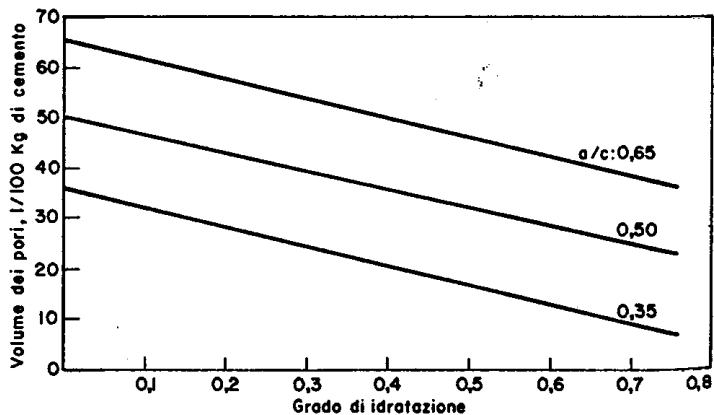


Fig. 2 - Volume dei pori (in litri per 100 Kg di cemento) in paste di cemento con diverso rapporto acqua/cemento in funzione del grado di idratazione.

porto a/c adottato, tanto minore deve essere il grado di idratazione, cioè tanto minore deve essere il tempo di stagionatura a umido per ridurre la porosità della matrice cementizia.

Analoghe considerazioni possono essere fatte sulla permeabilità del calcestruzzo: quanto più basso è il rapporto a/c adottato, tanto minore è il tempo di stagionatura richiesto per arrivare ad un determinato coefficiente di permeabilità. Nella Fig. 3 è mostrato come per raggiungere un determinato valore del coefficiente di permeabilità della matrice cementizia si richieda un maggior grado di idratazione (cioè un tempo di stagionatura più lungo) all'aumentare del rapporto a/c adottato.

5. CONSIDERAZIONI PRATICHE

Da un punto di vista pratico può essere importante conoscere dopo quale tempo di stagionatura umida un calcestruzzo, con un determinato rapporto a/c può essere di fatto considerato impermeabile. Nella Tabella 1 è mostrato il tempo di stagionatura necessario perchè la matrice cementizia, con un determinato rapporto a/c, presenti un coefficiente di permeabilità eguale a $1 \cdot 10^{-11}$ m/s, tale cioè che di fatto possa essere considerata "impermeabile". Si può vedere che in realtà è possibile produrre calcestruzzi impermeabili anche con rapporti a/c relativamente elevati purchè sia garantito un adeguato tempo di stagionatura umida.

Così, per esempio, anche un calcestruzzo con rapporto a/c di 0,60 diventerà di fatto impermeabile purchè sia stagionato per almeno 6 mesi. Val la pena di precisare che 6 mesi di stagionatura non necessariamente coincidono con 6 mesi di tempo dal momento del getto. Sei mesi di stagionatura significano sei mesi dal momento del getto purchè il calcestruzzo sia conservato in ambiente umido: in pratica questa situazione è raggiunta se il calcestruzzo rimane protetto dai casseri o da altre barriere all'evaporazione del vapore dal calcestruzzo verso l'ambiente. Da un punto di vista pratico questa situazione è difficilmente realizzabile soprattutto nei periodi stagionali (caldi e asciutti), durante i quali maggiormente fervono i lavori delle opere in calcestruzzo, e nelle strutture precocemente scasserate, o addirittura non scasserate affatto, come sono per esempio le pavimentazioni.

In assenza di un'adeguata stagionatura umida si verificano due inconvenienti:

- arresto del processo di idratazione del cemento per l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo con conseguente blocco del processo di impermeabilizzazione;

- formazione di cavillature e fessure sulle superfici precocemente esposte all'evaporazione (come sovente avviene nelle pavimentazioni) in conseguenza del ritiro plastico ed igrometrico.

Entrambi gli inconvenienti (carenza di idratazione del cemento e formazione di fessure) contribuiscono ovviamente a rendere il calcestruzzo più permeabile.

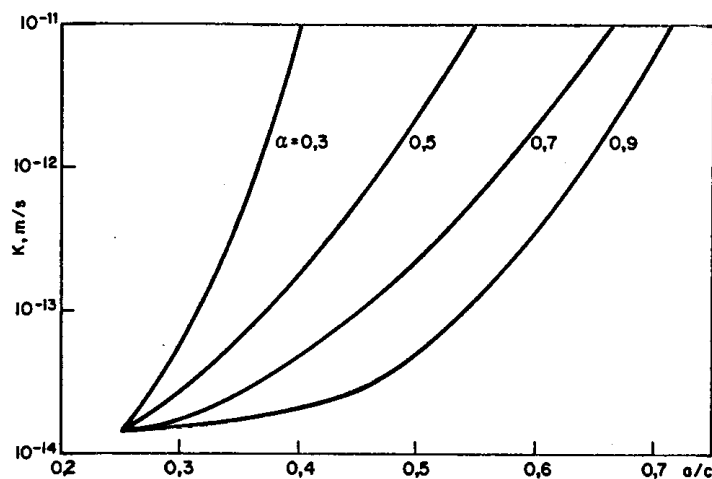


Fig. 3 - Coefficiente di permeabilità (K) per paste di cemento con diverso grado di idratazione (a) in funzione del rapporto acqua-cemento (a/c).

TABELLA 1

TEMPO DI STAGIONATURA UMIDA RICHIESTA PER OTTENERE UNA MATRICE CEMENTIZIA "IMPERMEABILE" PER DIVERSI RAPPORTI ACQUA/CEMENTO ($K = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s).

a/c	TEMPO (GIORNI)
0,40	3
0,45	7
0,50	14
0,55	28
0,60	180
0,70	365

Per ovviare a questi inconvenienti è necessario che il tempo di stagionatura richiesto per la "impermeabilità" sia limitato ad un tempo ragionevolmente breve ed attuabile nelle condizioni pratiche di cantiere. Per esempio, con un calcestruzzo caratterizzato dal rapporto a/c di 0,50 è sufficiente una stagionatura umida di due settimane (Tabella 1) per ottenere un conglomerato "impermeabile".

Val la pena di segnalare che tanto la norma nazionale UNI 9858 quanto quella europea ENV 206, raccomandano un rapporto a/c non superiore a 0,55 quando si richiede un calcestruzzo

zo "impermeabile". Questa condizione (come si può vedere in Tabella 1) è raggiunta purchè si assicuri che per i primi 28 giorni dal getto le strutture siano conservate in ambiente umido.

Una stagionatura umida, sufficiente a garantire la "impermeabilità" ($K = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s) di un calcestruzzo confezionato con rapporto a/c di 0,55, può essere in pratica realizzata in uno dei seguenti modi:

- a) scasserare a 28 giorni dal getto;
- b) bagnare il calcestruzzo con acqua nebulizzata per (28-x) giorni, dove x è il tempo (in giorni) di scasseratura;
- c) proteggere meccanicamente con teli impermeabili o teli porosi permanentemente inumiditi per (28-x) giorni;
- d) applicare una membrana anti-evaporante (agente stagionante) subito dopo la scasseratura o, per le pavimentazioni, subito dopo il getto.

Quantunque la procedura d) sia meno efficace delle altre, e di quella b) in particolare, essa è in genere la più praticabile in vista delle difficoltà operative che comportano le altre procedure e quella a) in particolare. Essa consiste nello spruzzare sulla superficie libera della struttura un prodotto ceroso disciolto in un solvente organico la cui evaporazione provoca la formazione di una pellicola che dovrebbe agire da barriera anti-evaporante per circa 1 mese. Ovviamente è necessario valutare la reale efficacia del prodotto secondo i procedimenti normalizzati (UNI 8656).

Adottando un rapporto a/c più basso di 0,55, la "impermeabilità" è conseguita in un tempo più breve: per esempio il calcestruzzo diventa "impermeabile" in soli tre giorni con a/c di 0,40 ed in due settimane con a/c di 0,50. Poichè però il costo del calcestruzzo aumenta al diminuire del rapporto a/c, si pone il problema se adottare un basso rapporto a/c per diminuire il tempo di stagionatura, o innalzare il rapporto a/c e prescrivere una stagionatura umida più prolungata. D'altra parte, occorre tener conto che esistono altre esigenze nella determinazione del più adatto rapporto a/c; queste sono sostanzialmente identificabili in:

- esigenze di carattere statico (resistenza caratteristica);
- esigenze di durabilità (ambiente aggressivo).

In sostanza le strutture per le quali ci si pone il problema della "impermeabilità" potrebbero essere suddivise in due tipologie:

- strutture per le quali si richiede un calcestruzzo "impermeabile" (per esempio: canali, vasche, acquedotti, dighe, ecc.) situato in un ambiente non aggressivo;
- strutture per le quali si richiede un calcestruzzo "impermeabile" e resistente alle sollecitazioni aggressive dell'ambiente (solfati, cloruri, gelo/disgelo, ecc.).

Nel seguito del presente articolo verranno esaminate le strutture idrauliche in ambienti non aggressivi, rinviando ad una nota successiva l'esame delle strutture (idrauliche e non) esposte all'azione di agenti aggressivi (opere marittime, opere stra-

dali, autostradali ed aeroportuali esposte ai sali disgelanti nei periodi invernali, ecc.).

Val la pena di precisare la differenza tra la raccomandazione per confezionare un calcestruzzo "impermeabile" e la procedura per misurare e controllare la "impermeabilità": tanto la UNI 9858 quanto la ENV 206 raccomandano di non superare, per il rapporto a/c, il valore di 0,55 come guida per il produttore di calcestruzzo alla confezione di un manufatto "impermeabile". Tuttavia, entrambe le normative stabiliscono che il controllo della "impermeabilità" sia eseguito attraverso una misura della penetrazione di acqua sotto pressione attraverso un provino stagionato per 28 giorni in ambiente umido.

Questa misura dovrebbe essere effettuata con la procedura UNI 7699 secondo la raccomandazione UNI 9858, e con la procedura ISO 7031 secondo la raccomandazione ENV 206. In realtà il metodo di misura UNI 7699 non è stato ancora aggiornato per l'esecuzione della penetrazione dell'acqua: esso è rimasto ancora un metodo per la misura dell'assorbimento di acqua, e non già della penetrazione dell'acqua sotto pressione.

Pertanto, per il controllo della penetrazione dell'acqua viene nel seguito suggerito il metodo tedesco DIN 1048 (descritto nel paragrafo 2 del presente articolo) già adottato da alcune amministrazioni pubbliche italiane per il controllo della "impermeabilità" del conglomerato: la ragione di questa scelta sta nel fatto che il metodo DIN 1048 coincide con il metodo ISO 7031 menzionato dalla ENV 206 per il controllo della "impermeabilità" del calcestruzzo.

5.1 STRUTTURE IN CALCESTRUZZO "IMPERMEABILI" (IN AMBIENTI NON AGGRESSIVI)

Si supponga di dover eseguire una struttura per la quale, oltre alla resistenza caratteristica (R_{ck}), debba essere soddisfatta l'esigenza di "impermeabilità": quest'ultima (come si è già detto nel paragrafo 3) è quantificabile nella prescrizione di un coefficiente di permeabilità non superiore a $1 \cdot 10^{-11}$ m/s o in una penetrazione all'acqua secondo il metodo DIN 1048 non superiore a 20 mm.

In base alla Tabella 1, per soddisfare l'esigenza di "impermeabilità" sopra quantificata è sufficiente prescrivere:

- un rapporto a/c non superiore a 0,50;
- una stagionatura umida di almeno 14 giorni.

Poichè anche la resistenza caratteristica dipende dal rapporto a/c, si tratta in sostanza di verificare se il rapporto a/c adottato per l'esigenza di "impermeabilità" è congruente o meno con l'esigenza della resistenza caratteristica (R_{ck}) prevista per il conglomerato. In Fig. 4 è riportata la correlazione (mediata sui valori dei cementi Portland ordinari e ad alta resistenza esistenti in Italia) tra resistenza meccanica a compressione media (R_{cm}) del calcestruzzo e rapporto a/c. Da

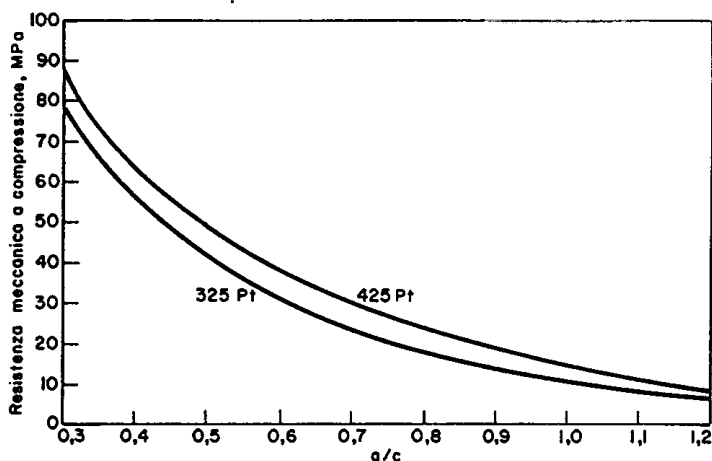


Fig. 4 - Resistenza meccanica a compressione media dopo 28 giorni di stagionatura a 20°C di calcestruzzi confezionati con cemento Portland ordinario e ad alta resistenza.

questo grafico si può riscontrare che la R_{cm} corrispondente al rapporto a/c di 0,50 (che garantisce la "impermeabilità" del calcestruzzo dopo 2 settimane di stagionatura umida) è pari a 43,5 MPa nel caso in cui si impieghi il cemento Portland ordinario (325 Pt). A questo valore di R_{cm} corrisponde una R_{ck} così calcolabile:

$$R_{ck} = 43,5 - 3,5 = 40 \text{ MPa (controllo di tipo A; cemento 325 Pt)}$$

$$R_{ck} = 43,5 - 1,48 = 35 \text{ MPa (assumendo uno scarto quadratico medio, } \delta, \text{ pari a 6 MPa per un controllo di tipo B; cemento 325 Pt)}$$

Pertanto se la R_{ck} richiesta è maggiore di 40 o 35 MPa, rispettivamente per un controllo di tipo A e B secondo la legge N. 1086, ne consegue anche che è soddisfatta la condizione di "impermeabilità" purchè il calcestruzzo sia stagionato a umido per almeno 14 giorni. Val la pena di precisare che - dato un certo valore di R_{ck} - la resistenza media a compressione (R_{cm}) di un calcestruzzo (e quindi il rapporto a/c con essa correlabile) dipende anche dal tipo di controllo (A o B) previsto dalla normativa (legge N. 1086) vigente [10].

Se invece la R_{ck} prevista è inferiore ai suddetti valori di 40 o 35 MPa (e quindi il rapporto a/c è maggiore di 0,50), ne consegue che a questo valore di R_{ck} non corrisponde la "impermeabilità" del calcestruzzo anche se stagionato a umido per 14 giorni. In queste condizioni è necessario cambiare la prescrizione della R_{ck} prevista nel progetto per adeguarne il valore ad un livello tale da renderlo congruente con la ri-

chiesta di "impermeabilità". In mancanza di questo adeguamento sono prevedibili ambiguità di interpretazione del capitolato tra committente e impresa, e tra impresa e produttore del calcestruzzo.

5.2 ESEMPI PRATICI DI PRESCRIZIONE DI CALCESTRUZZO "IMPERMEABILE"

Di seguito sono riportati alcuni tipici esempi di prescrizione di calcestruzzo "impermeabile" quali sono riscontrabili in opere civili per le quali la "impermeabilità" è un requisito essenziale e non esistono problemi di aggressione ambientale nei confronti del calcestruzzo. I primi due esempi si riferiscono, come sarà mostrato, a prescrizioni ambigue e che spesso sono fonti di contestazione in corso d'opera. Il terzo esempio, invece, rappresenta una prescrizione corretta e semplice di calcestruzzo "impermeabile".

1° Esempio

Per una struttura in calcestruzzo (per esempio: vasca di un depuratore con acque non aggressive), è prevista nel capitolato una R_{ck} di 25 MPa (con controllo di tipo A) e si richiede genericamente che il calcestruzzo sia anche "impermeabile". È previsto l'impiego di cemento Portland ordinario.

In questa situazione l'impresa si limiterà ad ordinare al pre-confezionatore un calcestruzzo a resistenza con R_{ck} di 25 MPa, stante la indeterminatezza sul valore e sul metodo di misura della permeabilità.

La resistenza meccanica media a compressione (R_{cm}) di questo calcestruzzo risulterà:

$$R_{cm} > 25 \text{ MPa} + 3,5 \text{ MPa}$$

Per questo calcestruzzo, assumendo che si impieghi un cemento Portland ordinario, è sufficiente adottare un rapporto a/c di circa 0,62 al quale corrisponde una R_{cm} di 30 MPa (Fig. 4). Incidentalmente, un calcestruzzo con questa prestazione potrebbe essere così costituito:

— acqua	190 kg/m ³
— cemento: (325 Pt)	305 kg/m ³
— sabbia: (0-5 mm)	790 kg/m ³
— ghiaia (5-25 mm)	1045 kg/m ³
— additivo fluidificante	0,8 kg/m ³
— slump	15 cm

Un calcestruzzo di questo tipo presenterebbe un coefficiente di permeabilità non superiore a $1 \cdot 10^{-11}$ m/s (condizione di "impermeabilità") solo dopo una stagionatura umida di oltre 6 mesi (Tabella 1), la qualcosa sarebbe di fatto impraticabile a meno che non si preveda una condizione meteorologica parti-

colarmente e permanentemente favorevole alla stagionatura umida ($UR > 95\%$).

2° Esempio

Nella stessa struttura in calcestruzzo dell'Esempio N° 1 sono previsti in capitolato i seguenti valori:

- $R_{ck} = 25$ MPa (prevista dal progettista);
- cemento: Portland ordinario;
- $a/c = 0,50$ (inferiore quindi al valore massimo raccomandato nella norma UNI 9858 o nella ENV 206 per garantire la "impermeabilità").

Molto spesso questo tipo di prescrizione (apparentemente corretta ma comunque carente per la mancata prescrizione del tempo di stagionatura) è riscontrabile in alcuni capitolati, anche di opere pubbliche particolarmente impegnative, al fine di contenere i costi del calcestruzzo attraverso la richiesta di una R_{ck} (25 MPa) non particolarmente elevata. In realtà, la suddetta prescrizione è ambigua per la incongruenza tra il rapporto a/c prescritto ($< 0,50$) e la R_{ck} richiesta (25 MPa). L'ambiguità sta nel fatto che in realtà un calcestruzzo con a/c di 0,50 presenterebbe una R_{ck} (con cemento Portland ordinario e controllo di tipo A) pari a 40 MPa: infatti dalla Fig. 4 si ricava che ad un rapporto a/c di 0,50 (con il cemento Portland ordinario) corrisponde una R_{cm} di 43,5 MPa, e pertanto con un controllo di tipo A si ottiene:

$$R_{ck} = R_{cm} - 3,5 \text{ MPa} = 43,5 \text{ MPa} - 3,5 \text{ MPa} = 40 \text{ MPa}$$

Incidentalmente, il calcestruzzo con questa prestazione ($R_{ck} = 40$ MPa) potrebbe essere costituito da:

- acqua	190 kg/m ³
- cemento (325 Pt)	380 kg/m ³
- sabbia (0-5 mm)	760 kg/m ³
- ghiaia (5-25 mm)	1015 kg/m ³
- additivo fluidificante	1 kg/m ³
- slump	15 cm

Si può notare come questo calcestruzzo sia di fatto più ricco in cemento (380 kg/m³) e quindi più costoso che non quello (305 kg/m³) previsto nell'esempio precedente con una R_{ck} di 25 MPa.

Stante questa situazione si possono prevedere due possibili sviluppi:

a) il produttore di calcestruzzo fa presente che di fatto la richiesta è assimilabile a quella di un calcestruzzo con R_{ck} di 40 MPa quale conseguenza della prescrizione sul rapporto a/c non superiore a 0,50;

b) il produttore di calcestruzzo (d'intesa o non con l'impresa) fornisce un calcestruzzo con R_{ck} di 25 MPa che di fatto presenterà un rapporto a/c notevolmente maggiore di 0,50 e quindi

non potrà garantire la richiesta "impermeabilità" sulla quale si è basata l'imposizione del rapporto a/c ($< 0,50$).

Nel caso a) si può ipotizzare una revisione dei prezzi a fronte del maggiore onere derivante da un calcestruzzo di maggiore resistenza caratteristica (40 MPa) rispetto a quella prevista nel capitolato (25 MPa).

Nel caso b) il calcestruzzo messo in opera risulterà di fatto permeabile, ma difficilmente potrà essere contestato in quanto congruente con la R_{ck} prevista nel capitolato. Si potrebbe in realtà contestare che il rapporto a/c impiegato risulti essere maggiore di quello prescritto (0,50) qualora si sia in grado di dimostrare tale deviazione. Quest'aspetto del problema è di difficile soluzione giacché si dovrebbe essere in grado di valutare - attraverso determinazioni analitiche - il contenuto di acqua ed il dosaggio di cemento in un calcestruzzo indurito. Per dimostrare le difficoltà pratiche di queste determinazioni è sufficiente precisare che, secondo la norma UNI 6505, per determinare il dosaggio di cemento è necessario disporre, oltre ad un campione di calcestruzzo contestato, anche dei campioni dello stesso cemento e degli stessi inerti che furono impiegati per la confezione di quello specifico calcestruzzo: la qualcosa implicherebbe che il preconfezionatore consegnasse - per ogni partita di calcestruzzo - un campione di cemento e di inerti impiegati per quel calcestruzzo; ma anche questa precauzione, da un punto di vista giuridico si presterebbe a non poche obiezioni, stante il fatto che la campionatura di cemento e di inerti sarebbe stata fatta non in contraddittorio ma a cura di una sola parte.

Tutte le considerazioni sopra esposte sono tutt'altro che ipotetiche, e rappresentano la regola ogni volta che ci si trova in una situazione contenziosa di questo tipo.

3° Esempio

Un corretto e semplice metodo per prescrivere il calcestruzzo "impermeabile" quale quello esaminato nei due precedenti esempi è il seguente:

- $R_{ck} = 40$ MPa (con cemento Portland ordinario e controllo di tipo A);
- stagionatura umida assicurata per 14 giorni dal getto;
- penetrazione dell'acqua determinata secondo DIN 1048 minore di 20 mm in accordo con la raccomandazione ENV 206 ed UNI 9858.

A dire il vero, già le prime due imposizioni, sono più che sufficienti a garantire la "impermeabilità": infatti per soddisfare la prima condizione ($R_{ck} = 40$ MPa con cemento Portland ordinario e controllo di tipo A), il produttore di calcestruzzo è costretto ad adottare un rapporto a/c sufficientemente basso ($a/c < 0,50$) e tale da garantire automaticamente la "impermeabilità", purché l'impresa provveda (seconda

condizione) a stagionare a umido il calcestruzzo con una delle procedure descritte nel paragrafo 5 e facilmente riscontrabili in cantiere.

La terza condizione (penetrazione dell'acqua < 20 mm secondo DIN 1048) sarebbe in realtà pleonastica; inoltre essa richiede una metodologia di prova più laboriosa che non la semplice determinazione della R_{ck} . Tuttavia, la misura della penetrazione dell'acqua secondo la DIN 1048, effettuata sia pure saltuariamente, avrebbe lo scopo di consolidare maggiormente la verifica della specifica qualità richiesta, l'"impermeabilità", per il calcestruzzo.

6. CONCLUSIONI

La prescrizione ed il controllo della "impermeabilità" del calcestruzzo può essere effettuata o mediante prescrizione e determinazione diretta del coefficiente di permeabilità (< $1 \cdot 10^{-11}$ m/s) o della penetrazione dell'acqua sotto pressione secondo la norma DIN 1048 in accordo con la raccomandazione ENV 206 ed UNI 9858.

In alternativa, e più semplicemente, si può prescrivere una resistenza caratteristica sufficientemente elevata e tale da garantire automaticamente la "impermeabilità" (per esempio $R_{ck} = 35$ o 40 MPa con cemento Portland ordinario e controllo di tipo A o B rispettivamente, che corrisponde ad un rapporto a/c di 0,50).

Affinchè il dato di laboratorio (coefficiente di permeabilità, oppure penetrazione dell'acqua, oppure R_{ck}) comunque determinato su un provino stagionato per legge a regola d'arte (28 giorni con UR > 95%), sia estendibile alla struttura reale (pavimentazione, rivestimento in galleria, vasca di depuratore, ecc.) è necessario che il calcestruzzo gettato in opera sia stagionato a umido per almeno 14 giorni adottando le protezioni necessarie alla evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo (bagnatura, cassetatura, teli impermeabili, agenti stagionanti).

BIBLIOGRAFIA

- [1] COLLEPARDI M.: "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo", pp. 177-180, 3ª Ed. Hoepli, Milano (1992).
- [2] A.M. Neville, "Properties of Concrete", pp. 382-388, Pitman Publishing, London (1975).
- [3] Norma DIN 1048, "Prüfverfahren für Beton", (Settembre 1968).
- [4] Norma UNI 9858, "Calcestruzzo - Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità", (Maggio 1991).
- [5] Prenorma Europea ENV 206, "Concrete - Performance, production, placing and compliance criteria", (1991).
- [6] COLLEPARDI M., L. COPPOLA: "Mix-Design del Calcestruzzo", Ed. Enco, Spresiano (1990).

In alternativa, è possibile prescrivere valori di R_{ck} più bassi (33 o 29 MPa corrispondenti con un cemento Portland ordinario ad un rapporto a/c di 0,55 rispettivamente con controllo di tipo A e B) purchè l'impresa assicuri una protezione del calcestruzzo dall'evaporazione dell'acqua per almeno 28 giorni dal getto.

Se, invece di un cemento Portland ordinario (325 Pt), si impiega un cemento Portland ad alta resistenza (425 Pt), ferma restando la prescrizione del rapporto a/c (< 0,55) in accordo con la raccomandazione UNI 9858 ed ENV 206, la resistenza meccanica risulta ovviamente maggiore, come si può desumere dalla Fig. 4.

Nella Tabella 2 sono riassunte le combinazioni dei vari fattori che consentono il raggiungimento della "impermeabilità" di un calcestruzzo: R_{ck} , tipo di cemento, tipo di controllo, stagionatura umida.

TABELLA 2

RESISTENZA CARATTERISTICA E STAGIONATURA RICHIESTA PER L'IMPERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO.

CEMENTO	a/c	R_{cm} (MPa)	TIPO DI CONTROLLO: LEGGE N° 1086	R_{ck} (MPa)	TEMPO DI STAGIONATURA UMIDA
325 Pt	0,50	43,5	A	40	14 giorni
425 Pt	0,50	52,0	A	48	14 giorni
325 Pt	0,50	43,5	B*	35	14 giorni
425 Pt	0,50	52,0	B*	43	14 giorni
325 Pt	0,55	37,0	A	33	28 giorni
425 Pt	0,55	45,0	A	41	28 giorni
325 Pt	0,55	38,0	B*	29	28 giorni
425 Pt	0,55	45,0	B*	36	28 giorni

* Si è assunto $\delta = 6$ MPa.

- [7] E.C. Higginson, "Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete", J. Amer. Concr. Inst., 58, pp. 281-298, (Settembre 1961).
- [8] TOGNON G.: "Durabilità del calcestruzzo: criteri generali. Il calcestruzzo nelle gallerie in presenza di acque solfatiche", Atti della Giornata di Studio "L'evoluzione della tecnologia dei calcestruzzi in galleria", pp. 22-55, Milano (1992).
- [9] POWERS T.C.: "The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete", Portl. Cem. Assoc. Res. Dept. Bul., 90, p. 39, (Luglio 1958).
- [10] COLLEPARDI M.: "Il Principio del Mix-Design", Industria Italiana del Cemento, 655, pp. 333-340, (Maggio 1991).