Resistenza alla penetrazione di acqua nel calcestruzzo

Aspetti normativi

Prof. Vito Alunno Rossetti - Università degli Studi di Roma La Sapienza – Facoltà di Ingegneria

Dott. Ing. Antonella Ferraro – Libero professionista

Dott. Ing. Pietro Mazzoli – Direttore Area Ingegneria – Impresa Pizzarotti & C. S.p.A.

1. PREMESSA

Nell'ambito del controllo della qualità del calcestruzzo fornito ai vari cantieri della BreBeMi (collegamento autostradale di connessione tra Brescia, Bergamo e Milano) sono state eseguite numerose prove di resistenza alla penetrazione dell'acqua secondo la UNI 12390-8.

Di fronte alla necessità di adottare un criterio generale di valutazione dei risultati ottenuti dalla prova, si è trovata una situazione attuale della normativa tecnica alquanto complessa e confusa. Si è cercato di fare un'ampia analisi in merito all'evoluzione delle norme riguardanti la permeabilità e la resistenza alla penetrazione dell'acqua del calcestruzzo, allo scopo di contribuire ad una maggiore comprensibilità.

2. EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA SULLA PERMEABILITÀ DEL CALCESTRUZZO

Pur senza addentrarsi in una comparazione dei diversi documenti e metodi, gli Autori della presente Nota, ritengono utile un breve richiamo dell'evoluzione normativa prima dell'analisi delle varie norme relative alla permeabilità del calcestruzzo.

2.1 Gli inizi: permeabilità e resistenza alla penetrazione

Fino a circa tre decenni fa, l'interesse per la caratteristica dell'impermeabilità del calcestruzzo, intesa come la capacità di ostacolare il flusso d'acqua attraverso il materiale, si riferiva normalmente alla realizzazione delle strutture destinate al contenimento dell'acqua, come serbatoi, condotte, vasche e simili.

All'epoca, si eseguivano con vari metodi prove di permeazione a ***flusso costante*** (steady-state permeation), che permettevano la determinazione del coefficiente di permeabilità K[1], applicando a provini o carote un gradiente di pressione e raccogliendo a valle del provino l'acqua permeata; ad esempio la prova Arredi, messa a punto nel Laboratorio di Idraulica della Facoltà di Ingegneria di Roma.

Poiché il calcestruzzo è per sua natura poco permeabile, e tanto meno quanto migliore è la sua qualità, tali prove richiedevano tempi lunghi e pressioni elevate.

Non esistevano però prove Standard Nazionali e tanto meno internazionali. Ad esempio la Norma Inglese BS 5337:1976 "The structural use of concrete for retaining acqueous liquids",

[1] Vito ALUNNO ROSSETTI: "Il Calcestruzzo – materiali e tecnologia" Ed. McGraw-Hill, 2007, pag. 90

pur sottolineando (al punto 4.8) la necessità di usare calcestruzzo a bassa permeabilità (low permeability), sia per evitare perdita d'acqua sia ai fini della durabilità, affermava nel medesimo punto 4.8:

> No general provision has been included in this code for percolation or permeability tests on concrete specimens. The reasons for this are, first, that it is difficult to perform such tests with results truly representative of the water-tightness of the structure and, second, it is a matter of experience that, provided that the recommendations of this code are followed, concretes of grades 25 and above, with cement contents not less than the minimum specified will, if fully compacted, give degrees of impermeability adequate for all ordinary purposes

È evidente la scarsa fiducia nei metodi di prova esistenti (non Standard), la mancanza di una prova Standard e la convinzione che un calcestruzzo di resistenza C25/30 fosse sufficiente ad assicurare la bassa permeabilità e la durabilità.

A seguito dell'introduzione in Italia, nel 1991, della Norma UNI 9858, una versione "aggiustata" della bozza di EN 206 all'epoca in elaborazione, si è generalizzata l'esigenza primaria della durabilità, con la conseguente necessità di usare calcestruzzo impermeabile, caratterizzato rispetto al passato da una sensibile riduzione del rapporto acqua/cemento.

L'adozione di bassi valori del rapporto acqua/cemento ha portato senza dubbio all'impiego diffuso di calcestruzzo molto più impermeabile di quelli impiegati in passato, ma anche a maggiori difficoltà (pressioni e tempi più elevati) per la misura dell'impermeabilità del calcestruzzo. Di conseguenza:

- i metodi basati sulla misura della permeazione sono stati abbandonati o non sono mai diventati degli Standard (come il metodo ISO/DIS 7032). Per quanto risulta agli scriventi l'unica eccezione è stata la norma spagnola UNE 83310, oggi abbandonata;
- si è passati a metodi detti di "resistenza alla penetrazione dell'acqua sotto pressione" il cui risultato è la misura della profondità della penetrazione d'acqua nel provino cubico o cilindrico (quindi **non-steady-state**, ovvero senza permeazione d'acqua), per effetto della pressione e tempo di prova. Esistono alcune prove che hanno raggiunto lo status di Standard; per esse le condizioni di prova variano sensibilmente (ad es. DIN 1048, ISO/DIS 7031, UNE 83309). Dal 2008 i Paesi che aderiscono al CEN hanno messo a punto la Norma UNI EN 12390-8:2008 che supera le precedenti;
- la determinazione del coefficiente di permeabilità K, richiamato nelle Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale (vedi più avanti), non può essere eseguita avvalendosi di un metodo Standard (non esistente). Alcuni autori pretendono di risalire a un valore di K in base alla velocità di penetrazione dell'acqua ricavabile dalla prova secondo Norma UNI EN 12390-8 e applicando la nota equazione di Valenta[2]: chi scrive ritiene che

[2] Valenta O. Durability of Concrete. Materials and Structures, vol. 3. No. 17, pp. 333-345 (1970)

l'equazione citata, relativa alla permeazione in condizione steady-state[3], non possa essere applicata alla penetrazione non-steady-state.

2.2 La UNI 9858:1991

La prima norma italiana in cui si parla di resistenza alla penetrazione dell'acqua, allo scopo di avere un calcestruzzo impermeabile, è la UNI 9858-1991, come già detto una versione "aggiustata" (preparata in sede Calcestruzzi Spa) della bozza di EN 206 all'epoca in elaborazione. La prova viene introdotta per motivi legati alla durabilità, come requisito facoltativo (8.2.3).

Tale norma (ritirata nel 2001 e sostituita dalla Norma UNI EN 206) al punto 7.3.1.5, facendo riferimento alla resistenza alla penetrazione dell'acqua, citava la UNI 7699.

> 7.3.1.5. Calcestruzzo impermeabile: resistenza alla penetrazione dell'acqua
>
> 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.

Tale citazione è errata e genera confusione: infatti la 7699 descrive il metodo per la determinazione per via gravimetrica dell'assorbimento di acqua alla pressione atmosferica (e non sotto pressione d'acqua) di provini di calcestruzzo indurito e non misura alcuna profondità di penetrazione.

Inoltre, per accrescere la confusione, la UNI 9858 dà come valori di riferimento per avere un calcestruzzo impermeabile, una profondità massima di penetrazione di 50 mm e come valore medio 20 mm, precisando che il calcestruzzo deve avere un rapporto a/c inferiore a 0.55.

I valori indicati nel riquadro precedente non hanno senso perché nella prova UNI 7699 non si misura alcuna profondità di penetrazione, come già si è detto. È invece interessante notare che i valori del riquadro: 50 mm e 20 mm sono ripresi dalla preesistente Norma DIN 1048, ormai abbandonata.

3. ASPETTI NORMATIVI ATTUALI SUL CALCESTRUZZO IMPERMEABILE

Le Norme Tecniche (D.M. 14.01.2008) affermando che la durabilità deve essere garantita, al punto 11.2.1, fanno riferimento alla Norma UNI EN 206:2006:

> Al fine di ottenere le prestazioni richieste, si dovranno dare indicazioni in merito alla composizione, ai processi di maturazione ed alle procedure di posa in opera, facendo utile riferimento alla norma UNI ENV 13670-1:2001 ed alle Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo pubblicate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, nonché dare indicazioni in merito alla composizione della miscela, compresi gli eventuali additivi, tenuto conto anche delle previste classi di esposizione ambientale (di cui, ad esempio, alla norma UNI EN 206-1: 2006) e del requisito di durabilità delle opere.

[3] A.M. Neville, Properties of Concrete, pag. 494

Al punto 11.2.11 Durabilità, le Norme Tecniche, (a differenza della 206 come si vedrà più avanti), indicano come prova facoltativa per la valutazione della durabilità la misura della profondità di penetrazione dell'acqua secondo la UNI EN 12390-8:

> Ai fini della valutazione della durabilità, nella formulazione delle prescrizioni sul calcestruzzo, si potranno prescrivere anche prove per la verifica della resistenza alla penetrazione agli agenti aggressivi, ad esempio si può tener conto del grado di impermeabilità del calcestruzzo. A tal fine può essere determinato il valore della profondità di penetrazione dell'acqua in pressione in mm.
>
> Per la prova di determinazione della profondità della penetrazione dell'acqua in pressione nel calcestruzzo indurito vale quanto indicato nella norma UNI EN 12390-8:2002.

3.1 La Norma UNI EN 206

La **UNI EN 206:2006** considera la resistenza alla penetrazione dell'acqua un requisito aggiuntivo. Per la sua determinazione non segnala nessun metodo, ma lascia che siano il prescrittore e produttore a concordarlo, oppure propone di specificarla indirettamente mediante i valori limite per la composizione della miscela (in pratica, il rapporto acqua/cemento e la resistenza meccanica a compressione).

> 5.5.3 **Resistenza alla penetrazione dell'acqua**
>
> Se si deve determinare la resistenza alla penetrazione dell'acqua su campioni di prova, il metodo e i criteri di conformità devono essere concordati fra il prescrittore e il produttore.
>
> In assenza di un metodo concordato, la resistenza alla penetrazione dell'acqua può essere specificata indirettamente per mezzo di valori limite per la composizione del calcestruzzo.

3.2 Le Linee Guida

L'unico documento, in cui troviamo delle prescrizioni in merito alla permeabilità del calcestruzzo (considerato dalle Norme Tecniche come utile riferimento, perciò non cogente), sono le "Linee Guida sul Calcestruzzo strutturale".

In tale documento si ritiene, sulla base di dati sperimentali di non documentata provenienza, che per ottenere un calcestruzzo adeguatamente impermeabile si dovrebbe avere un coefficiente di permeabilità K, non superiore a 1.10^{-11}m/s o una resistenza alla penetrazione dell'acqua non superiore a 20 mm, come valore medio e non superiore a 50 mm, come valore massimo (secondo ISO 7031-1994).

> Ai fini della durabilità, il calcestruzzo dovrebbe avere un coefficiente di permeabilità K inferiore o uguale a $1 \cdot 10^{-11}$ m/s o una resistenza alla penetrazione di acqua secondo ISO 7031-1994 (UNI E 07.04.113.0), con valore massimo non superiore a 50 mm e valore medio non superiore a 20 mm. Quindi sono da considerare equivalenti le prescrizioni seguenti, relative all'impermeabilità di un calcestruzzo:
>
> – coefficiente di permeabilità $K \leq 1 \cdot 10^{-11}$ m/s
>
> – spessore medio di penetrazione dell'acqua ≤ 20 mm.
>
> Il valore medio di penetrazione non superiore a 20 mm per il quale il materiale è ritenuto adeguatamente impermeabile non ha giustificazione fisica ma è stato dedotto sulla base di indagini sperimentali.

Tali limiti, sia quelli del coefficiente di permeabilità che della profondità di penetrazione, non possono però essere presi in considerazione in quanto:

- la ISO 7031 del 1994, non dà risultati confrontabili con la Norma UNI EN 12390, dovendo essere eseguita a pressione variabile anziché costante;
- la misura del valore di K richiede la permeazione di un flusso costante di acqua attraverso il provino, prova descritta solo dalla ISO/DIS 7032 non standardizzata e irreperibile.

Si nota inoltre, come le stesse Linee Guida, attribuiscano un'importanza minima alle misure di profondità di penetrazione e suggeriscono, nella pratica ordinaria, il controllo della durabilità e in particolare della permeabilità del calcestruzzo, attraverso la resistenza a compressione.

Presumibilmente, la scarsa fiducia è dovuta alla scarsa attendibilità del metodo, legato alla manualità della prova.

> Nella pratica ordinaria il controllo di qualità del calcestruzzo durabile è, più semplicemente, basato sulla misura della resistenza a compressione (resistenza caratteristica). Il criterio ha come riferimento la relazione permeabilità-rapporto a/c-resistenza meccanica. Al diminuire di a/c, diminuisce il volume dei pori capillari o penetrabili dalle sostanze presenti nell'ambiente di esposizione e di conseguenza diminuisce la permeabilità mentre aumenta la resistenza meccanica. Benché non vi sia una relazione lineare decrescente tra permeabilità e resistenza, tuttavia il controllo della durabilità attraverso la resistenza risulta sufficientemente affidabile.
>
> Il grado di affidabilità è senz'altro maggiore di quello che si avrebbe qualora il controllo venisse effettuato mediante la misura del rapporto a/c, considerando che i metodi per valutare il dosaggio di acqua e di cemento in un calcestruzzo non sono semplici e soprattutto non sufficientemente precisi.

3.3 La Norma UNI EN 12390-8

Attualmente, in definitiva, l'unica prova utilizzabile per indagare sul grado di permeabilità del calcestruzzo è la prova di resistenza alla penetrazione dell'acqua descritta nella UNI EN 12390-8 indicata dalla stesse Norme Tecniche. Tale UNI descrive solo il procedimento della ***prova senza dare nessuna indicazione in merito alla valutazione dei risultati***.

3.3.1 Considerazioni sulla validità della UNI EN 12390-8

Il documento normativo, secondo gli scriventi si presenta molto lacunoso aggiungendo quindi alle difficoltà della misura ulteriori elementi di incertezza. In particolare, tralasciando aspetti di minore importanza, si riscontra che:

- nel procedimento di preparazione del provino si indica che immediatamente dopo la sformatura del provino la superficie da sottoporre alla pressione dell'acqua deve essere irruvidita con spazzola metallica, proseguendo la stagionatura del provino in acqua. L'irruvidimento dovrebbe quindi avvenire dopo qualche giorno dal confezionamento del provino e non al momento della prova come in genere si verifica. In tal modo parte della prova viene trasferita all'impresa;
- viene indicato di eseguire la prova almeno a 28 giorni; ciò significa che si potrebbe fare la prova anche a sei mesi. La permeabilità del calcestruzzo nel tempo cambia significativamente (si veda il grafico di figura 1). Per esempio un calcestruzzo con

rapporto a/c = 0.6 a sei mesi presenta un grado di permeabilità analogo a quello che un calcestruzzo con a/c = 0.40 possiede a 3 giorni[4];

- la Norma sottolinea che il risultato di prova è la massima profondità di penetrazione espressa in mm; si ritiene che il punto in cui si ha la massima profondità corrisponda ad una difettosità puntuale e quindi tale valore non può essere rappresentativo della permeabilità del cubetto, tanto meno della fornitura di calcestruzzo. Sarebbe più opportuno che la Norma richiedesse di stimare una profondità media, come previsto ad esempio Nella ISO/DIS 7031.

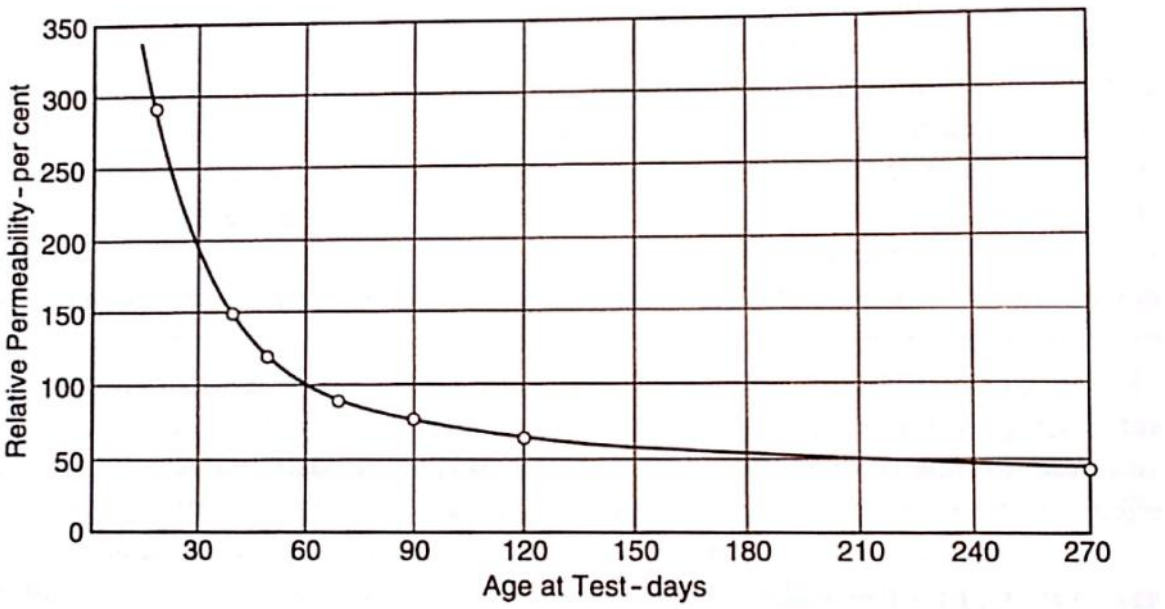

Fig. 10.4 Correction for age in U.S. Bureau of Reclamation test for permeability of concrete: the ordinate gives the permeability at any age as a percentage of permeability at the age of 60 days[10.43]

Figura 1 – Variazione nel tempo della permeabilità[5]

4. PROFONDITÀ DI PENETRAZIONE: RISULTATI SPERIMENTALI

Dei numerosissimi metodi per la determinazione della permeabilità del calcestruzzo, nessuno offre la necessaria affidabilità. Oltre al panorama offerto dalla letteratura tecnico scientifica, in parte descritto ai punti precedenti, anche per le prove normate la situazione non è diversa.

Ai punti seguenti si riportano un'esperienza degli scriventi e considerazioni sui risultati ottenuti da BreBeMi.

[4] A.M. Properties of Concrete, pag 33

[5] A. M. Neville, Properties of Concrete, pag 494

4.1 Risultati sperimentali in letteratura

Nella letteratura scientifica si ritrovano diversi studi in cui vengono messi a confronto dati sperimentali ottenuti utilizzando differenti metodi per la misura della resistenza di penetrazione dell'acqua.

In tali studi si evidenzia la difficoltà di ottenere l'accuratezza della misura, infatti anche con uno stesso metodo si ottengono valori che possono discostarsi più del 100% dal valore medio[6].

La difficoltà della misura della permeabilità del calcestruzzo o della misura della resistenza alla penetrazione dell'acqua viene confermata anche dal fatto che non esistono metodi ASTM su queste proprietà.

4.2 Risultati degli scriventi: prove eseguite con Autostrade

Tra i metodi di misura della permeabilità del calcestruzzo mai normalizzati, ha raggiunto una certa notorietà e diffusione il metodo di Figg[7]. Gli Autori di questa Nota hanno eseguito una sperimentazione in collaborazione con la Soc. Autostrade[8], eseguendo misure secondo Figg su diversi tipi di calcestruzzo. I risultati sono sintetizzati nel Grafico della figura seguente.

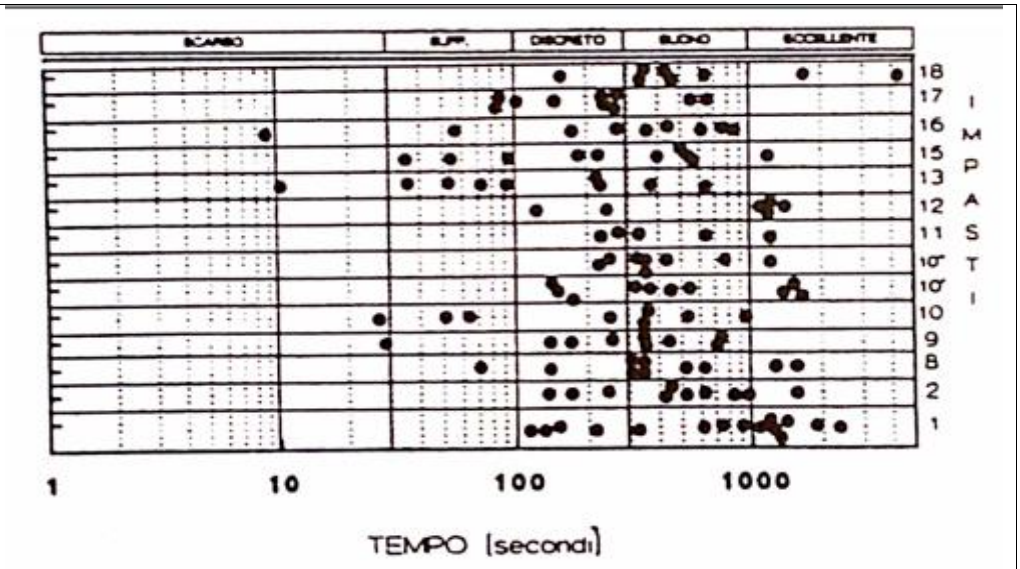

Figura 2 - Permeabilità misurata secondo Figg

Nel grafico, ogni riga si riferisce a una composizione di calcestruzzo e i risultati delle misure ripetute sono riportati come punti. In corrispondenza alla posizione dei punti si legge in alto la valutazione della qualità del materiale, rinunciando a priori ad una valutazione numerica/quantitativa.

[6] Rilem Report 12, "Performance criteria for concrete durability" pag. 222.

[7] J.W. Figg "Methods of measuring air and water permability of concrete", Magazine of Concrete Research, 25, 85, 213-219 (1973).

[8] Convegno AICAP 1993 – Pubblicato da AICAP Roma presso Multiaddress (RM) - Reperibile su http://www.clinicadelcalcestruzzo.it/Durabilita.html.

Si osserva che *per lo stesso calcestruzzo e manufatto*, la ripetizione della misura porta ad un'elevata dispersione dei valori ed a diverse valutazioni; ad esempio per la miscela 1 le misure indicano una qualità sia discreta, che buona, che eccellente.

Questi risultati confermano la difficoltà di misurare la permeabilità, associata certamente anche alle variazioni locali di composizione del conglomerato cementizio.

4.3 Risultati delle misure BreBeMi

Su numerosi prelievi di calcestruzzo usato nei cantieri della BreBeMi, sono state eseguite misure di resistenza alla penetrazione dell'acqua secondo la prova UNI EN 12390-8. Le misure hanno interessato diversi tipi di miscele con classe di resistenza differente, in particolare:

- Rck 35 XF4,
- Rck 40 XC4/XF1 o XC4/XF4 o XC4 o XF1,
- Rck 55 XC4/XF1 (o XC4 o XF1).

Per ciascuno degli oltre 100 prelievi si dispone di 4 dati di profondità di penetrazione dell'acqua (solo per alcuni si hanno solo due risultati), ottenuti da due Laboratori universitari, qui designati Laboratorio A e Laboratorio B (2 dati per ciascun Laboratorio).

Si riportano graficamente i dati di profondità di penetrazione (valore medio ottenuto su 2 cubi), distinti per Laboratorio, correlati con i corrispondenti dati di resistenze di prelievo desunti dai risultati delle prove ufficiali richieste dalla Direzione Lavori (si è considerato un valore medio nel caso di più dati).

Come si può osservare dalla figura 3 per entrambi i Laboratori non c'è una correlazione tra la profondità di penetrazione e la resistenza a compressione (in particolar modo nel caso del Laboratorio A). È noto che la permeabilità del calcestruzzo diminuisce con l'aumento della resistenza meccanica, ma dai risultati di resistenza alla penetrazione evidenziati da questi dati ottenuti secondo la UNI 12390-8, ciò non è riscontrabile (si vedano anche le Linee Guida). Inoltre i valori ottenuti da un laboratorio sono generalmente maggiori, mediamente del 60% (figura 4), rispetto a quelli ottenuti dall'altro, indicando come la prova dipenda molto dalla macchina e dall'operatore che la esegue.

Probabilmente i dati dei 2 laboratori non sono confrontabili perché le prove non sono eseguite necessariamente allo stesso tempo (ad esempio dal certificato di prova del Laboratorio B si osserva che il test è stato eseguito a circa a 4 mesi dal getto).

Nella misura delle profondità di penetrazione, in diversi casi è intervenuto anche un altro fattore, ovvero il cattivo confezionamento dei provini dovuto ad errate modalità attuate dagli operatori (come mostrano le foto che ci sono state trasmesse).

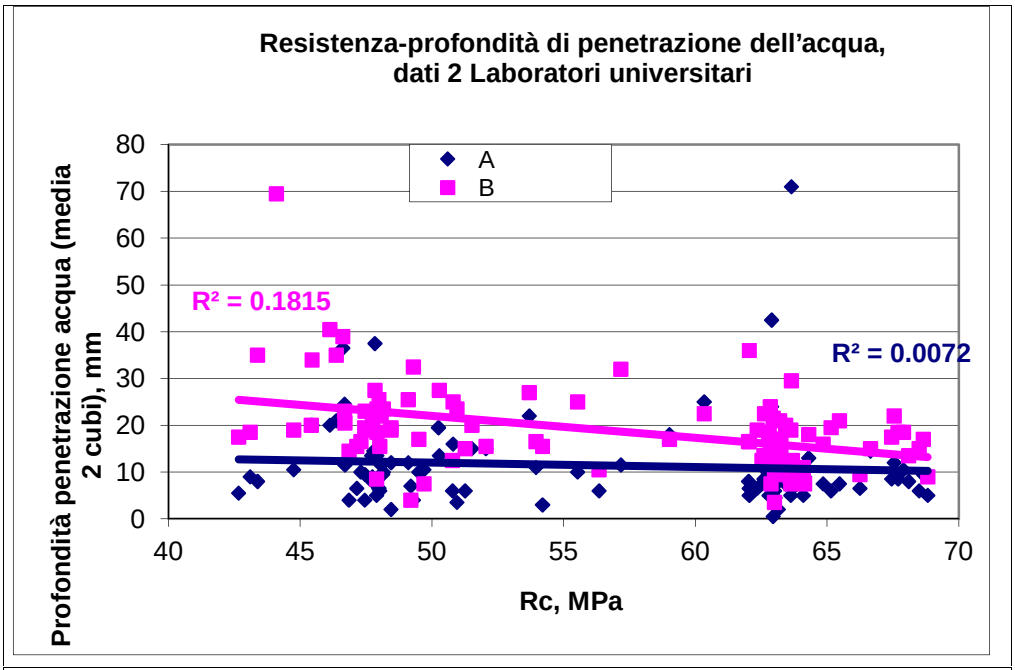

Figura 3 - Profondità di penetrazione (valore medio di 2 cubi) ottenute mediante prova UNI EN 12390-8 dal Laboratorio A e dal Laboratorio B correlate con la resistenza media di prelievo.

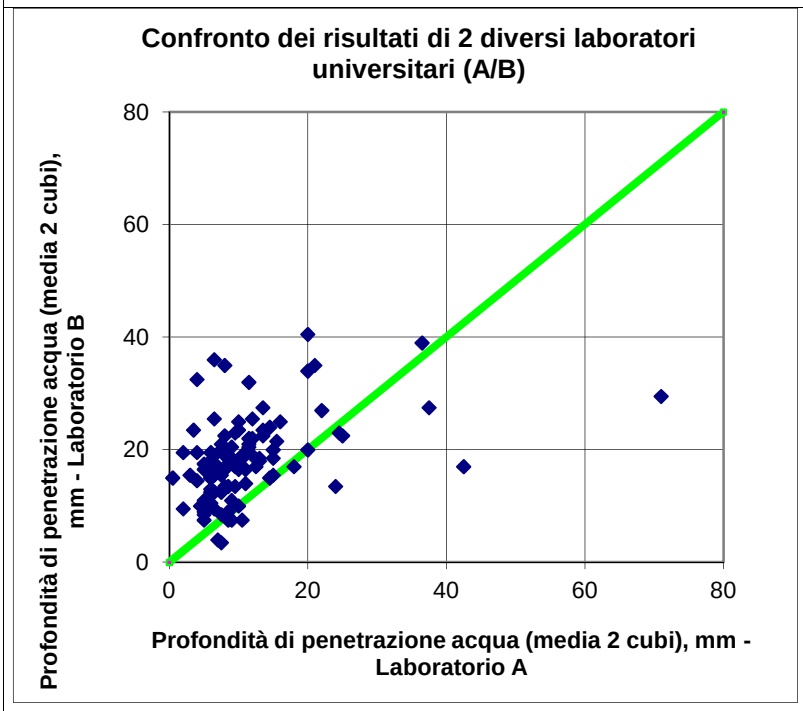

Figura 4 – Confronto dei risultati di penetrazione (UNI EN 12390-8) ottenuti sugli stessi impasti da 2 laboratori diversi.

4.4 I Laboratori e l'uso della Norma

Come se non fosse sufficiente l'incertezza generale della misura, qualche Laboratorio non si attiene strettamente alla Norma, come dovuto.

In questo caso il Laboratorio A, in particolare:

- riporta la penetrazione sui semiprovini di destra e di sinistra (?) e poi calcola la media, mentre la Norma UNI EN richiede il massimo assoluto, trovato sul semiprovino destro ***oppure*** sinistro,
- introduce un importante elemento di confusione riportando arbitrariamente le medie dei valori misurati su *diversi* provini, dimenticando che la prova è espressamente prevista dalla Norma UNI EN per fornire un solo valore ricavato su un solo provino. La determinazione del valore medio può portare a ritenere che la media di due (!) provini abbia maggior affidabilità del risultato singolo e che si avvicini maggiormente alla valutazione della qualità del calcestruzzo, dimenticando la grande dispersione dei risultati e quindi la necessità di introdurre un criterio statistico di valutazione, che proprio per la grande dispersione richiede necessariamente l'impiego di un gran numero di provini

5. CONCLUSIONI

Per indagare sulla permeabilità del calcestruzzo, le Norme Tecniche rimandano alla prova di penetrazione dell'acqua secondo UNI EN 12390-8:2002 senza indicare nessun criterio di valutazione dei risultati ottenuti. Inoltre, in merito alla durabilità in generale, indicano come utili riferimenti (quindi non cogenti) le Linee Guida sul calcestruzzo strutturale e la UNI EN 206:2006 e la UNI 11104.

Le Linee Guida riportano prescrizioni sulla permeabilità e profondità di penetrazione, non utilizzabili perché riferite a metodi non in uso o imprecisati.

La UNI EN 206 suggerita dalle Norme Tecniche, lascia che siano il prescrittore e produttore a concordare un metodo per determinare la resistenza di penetrazione dell'acqua nel calcestruzzo, oppure propone di specificarla indirettamente mediante i valori limite per la composizione della miscela.

La Prova di Permeabilità, condotta con qualsiasi metodo, come riportato in letteratura risulta scarsamente affidabile; i risultati ottenuti da due laboratori per BreBeMi lo dimostrano senza alcun dubbio.

Il nostro parere, in conclusione, vista l'attuale normativa, è che si possa basare la durabilità del calcestruzzo e quindi anche la sua permeabilità, sui valori limite della UNI EN 206, come previsto anche dalle Norme Tecniche, e dal documento applicativo UNI 11104, eliminando l'impiego della prova UNI EN 12390-8.