

# **Modifiche all'attuale sclerometro tipo N e realizzazione di nuove curve di correlazione tra gli indici sclerometrici e la resistenza meccanica a compressione dei conglomerati non strutturali, ordinari, ad alte prestazioni ed alte resistenze e nuova formulazione del metodo combinato.**

Giovanni Menditto (\*)

Stefano Bufarini (\*)

Vincenzo D'Aria (\*)

Michele Massaccesi (\*\*)

(\*) = *Università degli Studi di Ancona – Istituto di Scienza e Tecnica delle Costruzioni*

(\*\*) = *DRC srl– Ancona*

## *Sommario*

Le prove non distruttive trovano applicazione sempre più ampia nel campo dell'ingegneria civile. Pur tuttavia esiste ancora da parte del legislatore una certa perplessità nel normalizzare e quindi legittimarne l'impiego in luogo delle prove distruttive indicate dalla normativa per la qualificazione del conglomerato cementizio. Ciò è conseguenza del fatto che non è possibile stabilire curve di regressione, tra le grandezze da stimare (resistenza meccanica del conglomerato) e parametro non distruttivo, aventi carattere del tutto generale. Tale perplessità può essere superata costruendo curve di regressione specifiche per ogni tipo di conglomerato prodotto attraverso una campagna sperimentale la più estesa possibile.

### *1. Introduzione.*

Una corretta applicazione del metodo sclerometrico richiederebbe teoricamente il tracciamento delle curve di correlazione con riferimento al materiale in opera. Poiché questa operazione non è concretamente praticabile, soprattutto per la difficoltà oggettiva di conoscere la ditta produttrice del conglomerato, specie per le opere di non recente costruzione, ci si limita al tracciamento delle curve di regressione sulla base di provini preconfezionati con calcestruzzi aventi, nella migliore delle ipotesi, le stesse caratteristiche di quelle in opera o quantomeno analoghe sotto il profilo compositivo. Del resto la resistenza del calcestruzzo può essere stimata approssimativamente solo in presenza di una curva sperimentale di taratura che correli la resistenza di quel calcestruzzo e l'indice di rimbalzo. In mancanza può utilizzarsi una curva molto più generale che viene fornita come supporto dal costruttore dello sclerometro.

In tale ottica si è sviluppata una campagna sperimentale con riferimento ai conglomerati non strutturali, ordinari, ad alte prestazioni ed alte resistenze (da 5 N/mm<sup>2</sup> a 100 N/mm<sup>2</sup>), ottenibili disponendo di particolari ingredienti e di accorti mix-design.

Il tracciamento delle curve di correlazione è stato ottenuto sottoponendo in parallelo a prove non distruttive (determinazione degli indici sclerometrici e delle velocità di transito

degli impulsi ultrasonori) e prove distruttive (schiacciamento alla pressa) 50 provini cubici di 200 mm di lato per le 20 classi distinte di conglomerato di cui alla tabella 1, per un totale di 1000 campioni.

Tabella 1

Classe	Numero di provini	Classe di resistenza (N/mm <sup>2</sup> )	Categoria calcestruzzo
1	50	C5	Non strutturale
2	50	C10	
3	50	C15	
4	50	C20	Ordinario
5	50	C25	
6	50	C30	
7	50	C35	
8	50	C40	
9	50	C45	
10	50	C50	
11	50	C55	Alte prestazioni
12	50	C60	
13	50	C65	
14	50	C70	
15	50	C75	Alta resistenza
16	50	C80	
17	50	C85	
18	50	C90	
19	50	C95	
20	50	C100	

Le varie classi di resistenza ottenute sono state confezionate secondo opportune miscele, utilizzando cemento Portland ed assortimento di inerti tali da rappresentare standard tipici dei calcestruzzi italiani (foto n° 1).



Foto n° 1 - Vista generale dei provini rappresentativi di una classe di resistenza

## 2. Sclerometro meccanico utilizzato per le prove.

Lo sclerometro meccanico utilizzato per le prove è una modifica dell'apparecchio tradizionale tipo N (Fig. 1) operata dalla DRC srl – Ancona.

*Sezione longitudinale dello sclerometro Tipo N e relativa posizione al momento della percussione*

- 1 asta di percussione
- 3 carcassa
- 4 indice con astina
- 6 nottolino d'arresto
- 7 asta di scorrimento
- 8 disco di guida
- 9 calotta
- 10 segmenti di blocco
- 11 coperchio
- 12 molla di pressione
- 13 gancio
- 14 martello
- 15 molla-ammortizzatore
- 16 molla di percussione
- 17 ancoraggio molla
- 18 rondella di feltro
- 19 finestra
- 20 vite
- 21 contro-dado
- 22 perno
- 23 molla del gancio

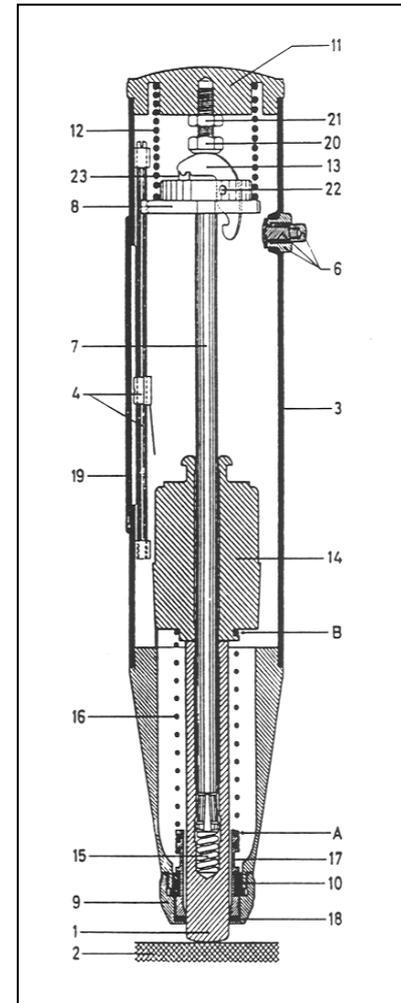


Fig. 1

In particolare:

- a) il supporto arpionismo è stato realizzato in alluminio, molto pastoso, ma con elevate finiture esterne, sì da ottenere ottime tolleranze per lo scorrimento dello stesso sulle guide della carcassa;
- b) l'asta di scorrimento del martello è stata modificata nel materiale, utilizzando un acciaio tipo C45 rettificato. Dimensionalmente è stato migliorato il sistema di bloccaggio fra l'asta ed il martello;
- c) il martello è stato modificato nel materiale, utilizzando un acciaio tipo C45 rettificato. Si è inoltre modificato il processo di foratura del martello per garantire una tolleranza di coassialità dell'ordine del millesimo di millimetro (+/- 0,001 mm);
- d) il martello è stato realizzato in modo tradizionale in acciaio al piombo PR80. E' stato modificato il trattamento superficiale, eseguendo la nitrurazione (Nit-OX) che aumenta la durezza del materiale (40 HRC) e la resistenza all'usura dello strato superficiale. La parte interna del materiale acquista resilienza e tenacità apportando

- una maggiore resistenza agli urti. Nella superficie di impatto con il martello si è inoltre eseguita una tempra ad induzione con durezza di 56/58 HRC;
- e) la molla di percussione ha subito una modifica del diametro del filo e della forma finale per migliorare l'assemblaggio. Il trattamento è stato variato sostituendo la zincatura con la nichelatura;
  - f) la molla di pressione ha subito una modifica del materiale, passando da un acciaio tipo C85 ad un acciaio INOX, evitando così di eseguire il trattamento superficiale;
  - g) la calotta è stata munita di una filettatura esterna dove verrà alloggiata un'apposita chiusura. La funzione della stessa è quella di impedire allo strumento di aprirsi durante il trasporto ed evitare lo sganciamento del pistone dalla sua sede;
  - h) un'impugnatura ergonomica in plastica e gomma è stata resa solidale con la parte posteriore della carcassa in modo da migliorare l'afferaggio dello strumento, ed impedire all'operatore di manipolare la meccanica interna dello stesso;
  - i) la scala graduata di lettura ha una dimensione maggiore di quella tradizionale. La stessa presenta delle modifiche grafiche che permettono di eseguire la lettura con risoluzione all'unità;
  - j) lo strumento viene consegnato con una custodia imbottita, di colore nero, dove alloggiare accessori a corredo. La custodia oltre a fornire una migliore protezione contro gli urti esterni, attraverso una tracolla, facilita anche il trasporto;
  - k) lo sclerometro viene fornito di una cinghia da polso per evitare cadute accidentali dello strumento;
  - l) lo sclerometro non riporterà l'adesivo con il diagramma delle curve sulla carcassa ma sarà fornito di un manuale di istruzioni contenenti le nuove curve di correlazione;
  - m) lo sclerometro può essere corredato di un software che elabora i risultati dando anche la possibilità di tracciare curve di regressione per specifici calcestruzzi;
  - n) l'apparecchio è accessoriatato con pietra al carburo di silicio, dima-stazione misura, fenolftaleina, gessi per il tracciamento delle griglie.

In alternativa all'apparecchio meccanico DRC srl – surveying division produce anche uno sclerometro elettronico con:

- a) un'impugnatura ergonomica in plastica e gomma solidale con la parte posteriore della carcassa in modo da migliorare l'afferaggio dello strumento ed impedire all'operatore di manipolare la meccanica interna dello stesso;
- b) un display multiriga dove è possibile visualizzare una serie di informazioni utili all'operatore. La scheda elettronica consente di eseguire la registrazione di circa 8000 battute, indicando per ognuna il corrispettivo valore, dando la possibilità di caricare più curve a seconda dell'utilizzo che si intende farne e di collegarsi al sito di servizi per ottenere aggiornamenti della stessa;
- c) un sistema magnetico di lettura che evita il contatto fra la scheda e lo stesso cursore. Questo sistema oltre ad aumentare la precisione della lettura evita problemi del non corretto funzionamento dovuti ad attriti tra i componenti interni;
- d) batterie al litio ricaricabili che assicurano un'autonomia di lavoro di 24 ore.

Per quanto riguarda la parte meccanica lo strumento riproduce sostanzialmente le caratteristiche di quello meccanico avanti descritto.

### 3. Fasi esecutive della campagna sperimentale.

I campioni utilizzati nella campagna sperimentale erano nelle condizioni ideali richieste dal metodo sclerometrico per la realizzazione di curve di correlazione, infatti:

- periodo di maturazione: 28 giorni;
- tenore di umidità relativa: costante;
- omogeneità della qualità del calcestruzzo tra superficie e strati profondi;
- fenomeni di carbonatazione degli strati superficiali: assenti;
- difetti interni: assenti.

Ciascun provino cubico, a maturazione avvenuta (28 giorni), è stato sottoposto:

- ad accurata pulitura delle sue superfici mediante pietra abrasiva a grana media in carburo di silicio, al fine di evitare che le facce del campione presentassero scalfitture o nidi di ghiaia o tessitura superficiale grossolana. Preventivamente si è controllato che la superficie del provino fosse asciutta, in modo da evitare fattori che potessero alterare il risultato della prova;
- ad un accurato controllo dimensionale e relativa pesatura (foto nn. 2÷3).



Foto n° 2 - Controllo dimensionale del provino

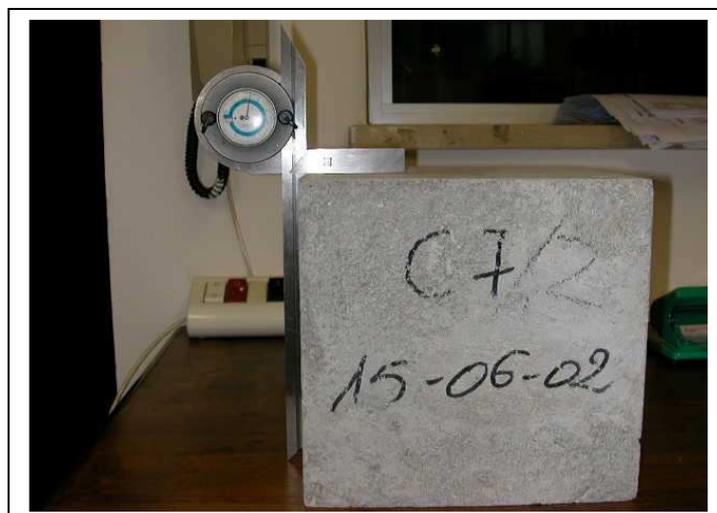


Foto n° 3 – Controllo della complanarità delle facce del provino

Di ogni campione sono state considerate, ai fini delle misure, tre facce escludendo sempre quella libera del getto.

Per rendere i risultati delle battute sclerometriche il più possibili indipendenti dall'operatore, è stata progettata e costruita dalla DRC un'attrezzatura denominata ATHR (Alfa Test Hammer Robot - brevetto n° AN2002A000028, foto n° 4) che consente l'automatico afferraggio dei provini cubici tra i piatti di una pressa con una sollecitazione di 1 N/mm<sup>2</sup>, in modo da tenerli rigidamente fissati, impedendone ogni movimento durante l'impatto. E' stato così possibile realizzare in sequenza nove battute per faccia, rilevandole da un'apposita telecamera e monitor esterno nelle condizioni di inclinazione dello strumento di  $\alpha = -90^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $+90^\circ$  (dove  $\alpha$  è l'angolo che l'asse dello sclerometro forma con l'orizzontale).

- alla determinazione della velocità di transito degli impulsi ultrasonori (foto n° 5);
- allo schiacciamento dei provini, sino alla classe di 60 N/mm<sup>2</sup> alla pressa da 3000 kN (Metro Com da 4000 kN, mod. PI-MP 400 T con dinamometro digitale) e dalla classe 65 N/mm<sup>2</sup> sino alla classe 100 N/mm<sup>2</sup> alla pressa da 5000 kN (Controls da 5000 kN, mod. C80/2 con dinamometro digitale).

Si è ottenuta una nuvola di punti sperimentali tra durezza superficiale e carico unitario di rottura.

Complessivamente sono state effettuate 27000 battute sclerometriche, 2000 valutazioni della velocità di transito degli impulsi ultrasonori e 1000 prove a compressione alla pressa.

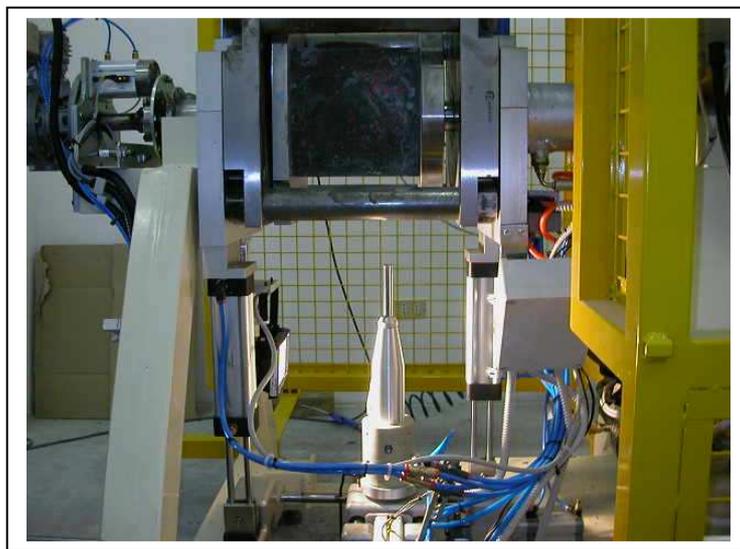


Foto n° 4 - Vista dell'ATHR (Alfa Test Hammer Robot) in azione

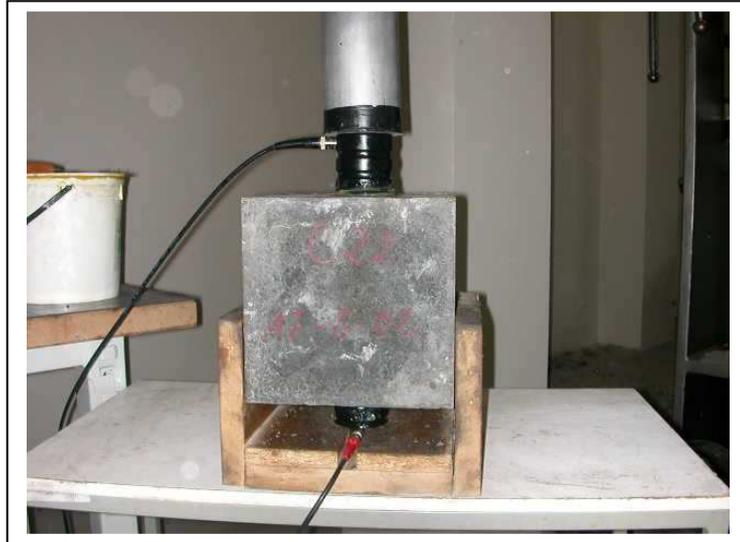


Foto n° 5 - Determinazione della velocità di transito degli impulsi ultrasonori

#### 4. *Miscela cementizie realizzate.*

Viene di seguito riportata una scheda “campione” (da allegato 1 a allegato 8) rappresentativa di una delle venti distinte classi di resistenza dichiarate.

In particolare:

- Allegato 1: Denominazione del mix e della classe di resistenza, di consistenza ed esposizione dichiarata;
- Allegato 2: Analisi granulometrica;
- Allegato 3: Rappresentazione grafica della composizione granulometrica delle singole pezzature;
- Allegato 4: Tabella mix;
- Allegato 5: Rappresentazione grafica della distribuzione granulometrica della miscela in funzione delle curve di riferimento;
- Allegato 6: Dosaggi della specifica miscela;
- Allegato 7: Calcolo della resistenza caratteristica.

**Mix R 20 S5 D25**

**Rck 20,0 N/mm<sup>2</sup>**

**Classe di Consistenza**

**Prova di abbassamento al cono secondo UNI 9418**

**"S5" (Superfluida)**

**Classe di Esposizione ambientale**

**secondo UNI 9658**

**DCK "2a"**

**secondo Linee guida Ministero dei LL.PP.**

**XC "1-2"**

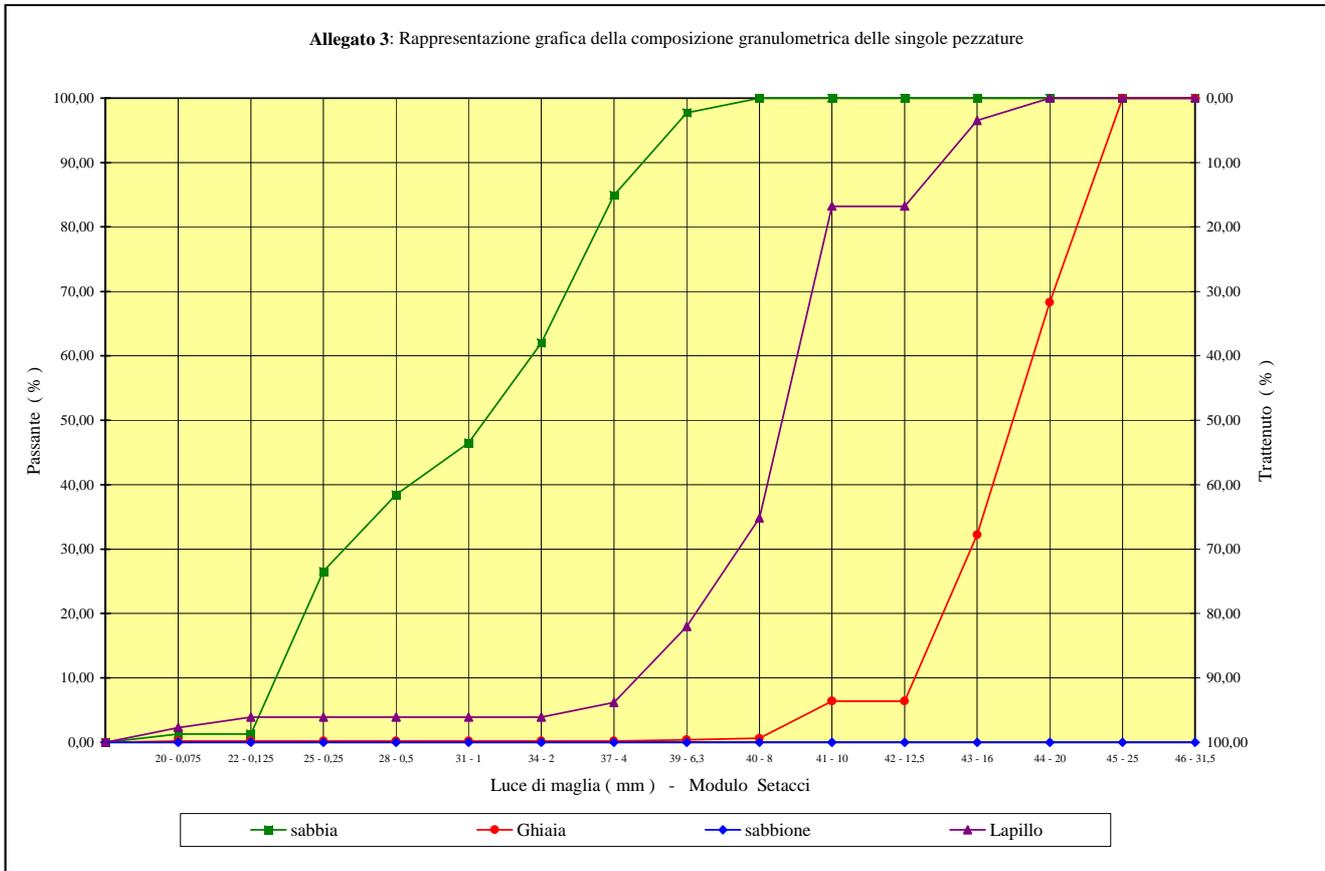
ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI 8520 parte 5°				
Campione tipo	Sabbia			
Quantità di campione (g)	1002,0	<b>Assorbimento</b>	<b>2,07</b>	
Metodo vagliatura	per via umida			
Data di prova	28/03/2002			
Stacci	Trattenuto	Trattenuto	Trattenuto	Passante
Modulo - Luce	Setaccio	Progressivo	Progressivo	Progressivo
(M) - (mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
46 - 31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
45 - 25	0,0	0,0	0,00	100,00
44 - 20	0,0	0,0	0,00	100,00
43 - 16	0,0	0,0	0,00	100,00
42 - 12,5	0,0	0,0	0,00	100,00
41 - 10	0,0	0,0	0,00	100,00
40 - 8	0,0	0,0	0,00	100,00
39 - 6,3	23,0	23,0	2,30	97,70
37 - 4	128,0	151,0	15,07	84,93
34 - 2	230,0	381,0	38,02	61,98
31 - 1	155,0	536,0	53,49	46,51
28 - 0,5	81,0	617,0	61,58	38,42
25 - 0,25	119,0	736,0	73,45	26,55
22 - 0,125	253,0	989,0	98,70	1,30
20 - 0,075	0,0	989,0	98,70	1,30
fondo	13,0	1002,0	100,00	0,00
Intervallo granulometrico :	<b>0-4</b>			
Modulo di finezza :	<b>3,40</b>			

ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI 8520 parte 5°				
Campione tipo	P.tto 7/15			
Quantità di campione (g)	1000,0	<b>Assorbimento</b>	<b>0,98</b>	
Metodo vagliatura	per via secca			
Data di prova	28/03/2002			
Stacci	Trattenuto	Trattenuto	Trattenuto	Passante
Modulo - Luce	Setaccio	Progressivo	Progressivo	Progressivo
(M) - (mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
46 - 31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
45 - 25	0,0	0,0	0,00	100,00
44 - 20	0,0	0,0	0,00	100,00
43 - 16	35,0	35,0	3,50	96,50
42 - 12,5	133,0	168,0	16,80	83,20
41 - 10	0,0	168,0	16,80	83,20
40 - 8	484,0	652,0	65,20	34,80
39 - 6,3	168,0	820,0	82,00	18,00
37 - 4	118,0	938,0	93,80	6,20
34 - 2	23,0	961,0	96,10	3,90
31 - 1	0,0	961,0	96,10	3,90
28 - 0,5	0,0	961,0	96,10	3,90
25 - 0,25	0,0	961,0	96,10	3,90
22 - 0,125	0,0	961,0	96,10	3,90
20 - 0,075	16,0	977,0	97,70	2,30
fondo	23,0	1000,0	100,00	0,00
Intervallo granulometrico :	<b>2-10</b>			
Modulo di finezza :	<b>6,40</b>			

ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI 8520 parte 5°				
Campione tipo	Sabbione			
Quantità di campione (g)	0,0	<b>Assorbimento</b>	<b>0,00</b>	
Metodo vagliatura	per via umida			
Data di prova	28/03/2002			
Stacci	Trattenuto	Trattenuto	Trattenuto	Passante
Modulo - Luce	Setaccio	Progressivo	Progressivo	Progressivo
(M) - (mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
46 - 31,5	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
45 - 25	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
44 - 20	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
43 - 16	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
42 - 12,5	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
41 - 10	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
40 - 8	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
39 - 6,3	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
37 - 4	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
34 - 2	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
31 - 1	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
28 - 0,5	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
25 - 0,25	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
22 - 0,125	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
20 - 0,075	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
fondo	0,0	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!
Intervallo granulometrico :	<b>0-6,3</b>			
Modulo di finezza :	<b>#DIV/0!</b>			

ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI 8520 parte 5°				
Campione tipo	Ghiaia 15/30			
Quantità di campione (g)	1000,0	<b>Assorbimento</b>	<b>0,98</b>	
Metodo vagliatura	per via secca			
Data di prova	28/03/2002			
Stacci	Trattenuto	Trattenuto	Trattenuto	Passante
Modulo - Luce	Setaccio	Progressivo	Progressivo	Progressivo
(M) - (mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
46 - 31,5	0,0	0,0	0,00	100,00
45 - 25	0,0	0,0	0,00	100,00
44 - 20	317,0	317,0	31,70	68,30
43 - 16	361,0	678,0	67,80	32,20
42 - 12,5	258,0	936,0	93,60	6,40
41 - 10	0,0	936,0	93,60	6,40
40 - 8	58,0	994,0	99,40	0,60
39 - 6,3	2,0	996,0	99,60	0,40
37 - 4	2,0	998,0	99,80	0,20
34 - 2	0,0	998,0	99,80	0,20
31 - 1	0,0	998,0	99,80	0,20
28 - 0,5	0,0	998,0	99,80	0,20
25 - 0,25	0,0	998,0	99,80	0,20
22 - 0,125	0,0	998,0	99,80	0,20
20 - 0,075	0,0	998,0	99,80	0,20
fondo	2,0	1000,0	100,00	0,00
Intervallo granulometrico :	<b>8-25</b>			
Modulo di finezza :	<b>6,98</b>			

Allegato 3: Rappresentazione grafica della composizione granulometrica delle singole pezzature



Allegato 4

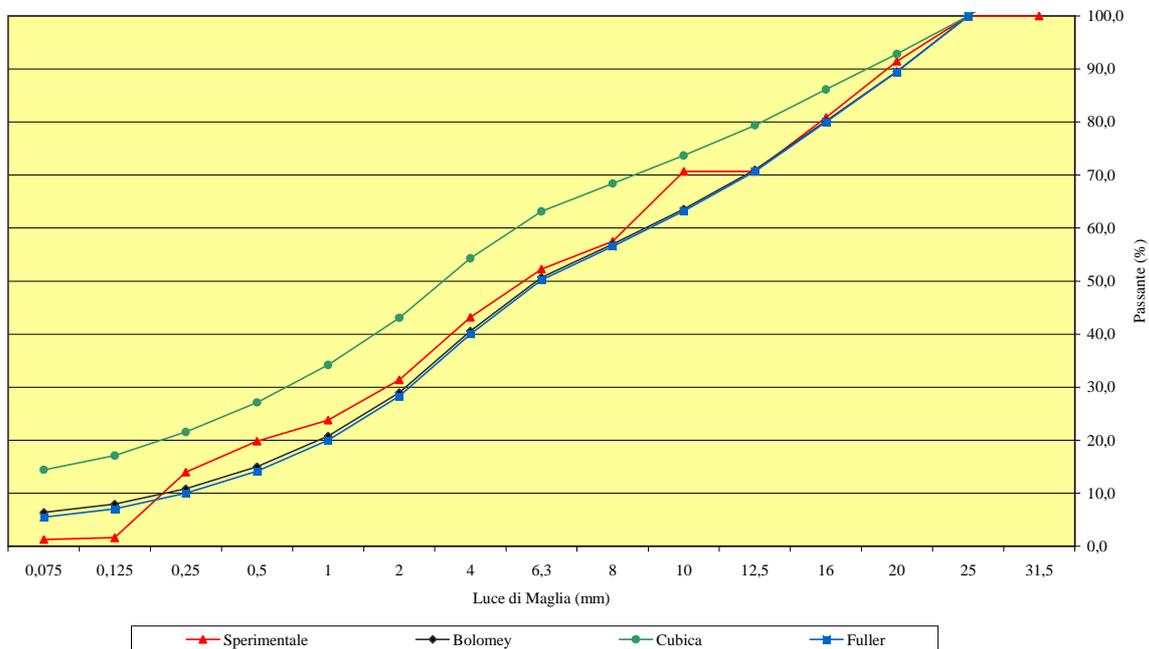
Setacci	Sabbia (0-4)		Sabbione (0-6,3)		Lapillo (2-10)		Ghiaia (8-25)		curva Sperimentale	curva Bolomey	curva Fuller	curva Cubica	
	100%	%	49	%	0	%	24	%					27
31,5	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	100,0	24,00	100,0	27,00	100,0	112,1	112,2	108,0
25	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	100,0	24,00	100,0	27,00	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	100,0	24,00	68,3	18,44	91,4	89,5	89,4	92,8
16	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	96,5	23,16	32,2	8,69	80,9	80,2	80,0	86,2
12,5	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	83,2	19,97	6,4	1,73	70,7	71,0	70,7	79,4
10	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	83,2	19,97	6,4	1,73	70,7	63,6	63,2	73,7
8	100,0	49,00	100,0	100,0	0,00	34,8	8,35	0,6	0,16	57,5	57,0	56,6	68,4
6,3	97,7	47,88	100,0	100,0	0,00	18,0	4,32	0,4	0,11	52,3	50,7	50,2	63,2
4	84,9	41,62	100,0	100,0	0,00	6,2	1,49	0,2	0,05	43,2	40,6	40,0	54,3
2	62,0	30,37	100,0	100,0	0,00	3,9	0,94	0,2	0,05	31,4	29,0	28,3	43,1
1	46,5	22,79	100,0	100,0	0,00	3,9	0,94	0,2	0,05	23,8	20,8	20,0	34,2
0,5	38,4	18,83	100,0	100,0	0,00	3,9	0,94	0,2	0,05	19,8	15,0	14,1	27,1
0,25	26,5	13,01	100,0	100,0	0,00	3,9	0,94	0,2	0,05	14,0	10,9	10,0	21,5
0,125	1,3	0,64	100,0	100,0	0,00	3,9	0,94	0,2	0,05	1,6	8,0	7,1	17,1
0,075	1,3	0,64	100,0	100,0	0,00	2,3	0,55	0,2	0,05	1,2	6,4	5,5	14,4
fondo													

cemento= **210** kg/m3  
 A= **10**  
 C= **9,1**  
 Dmax= **25**  
 H<sub>2</sub>O = **180** litri  
 Rapporto A/C **0,857**

$$\frac{R_{ck}}{\text{Res. eff. Cem}}$$

R <sub>ck</sub>	20
Res.Cem	42,5

Allegato 5: Rappresentazione grafica della distribuzione granulometrica della miscela in funzione delle curve di riferimento



Allegato 6

Codice Miscela	Mix R 20 S5 D25										
Impasto n°	4										
classe Resistenza CLS	20,0 N/mm²										
consistenza	Superfluida "S5"										
cemento tipo	Cemento ENV 197/1 - CEM II/A-L 42,5 R - Cementir										
Diametro Max	25 mm										
additivo tipo	Glenium 27- Acrilico										
	dosaggio	masse asciutte-kg (con singole MV pezzat.)	masse Volum. kg/l	volumi assoluti - l	massa Volum. del misto -kg/l	masse asciutte (con MV misto) - kg	umidità inerti - %	Correz. H2O (Colon. AG) - l	masse umide (da col. AG) - kg	masse umide (da col. AK) - kg	correz. H2O (Colon. AK) - l
<b>COMPONENTI</b>											
cemento		210	3,0	70		210			210	210	
acqua		180	1,0	180		180		54,1	125,9	-5503,2	5683,2
rapporto A/C		0,857									
aria				25							
cem+acqua+aria				277							
totale litri				1000							
<b>INERTI</b>		1921,9		723	265,863	192192			1976,0	197875,6	
Sabbia	49,0	936,2	2,643	35422		94174,3	5,00	46,8	983,0	99130,8	4956,5
Sabbione	0,0	0,0	2,673	0		0,0	5,00	0,0	0,0	0,0	0,0
P.tto 7/15	24,0	463,4	2,671	17350		46126,2	1,00	4,6	468,0	46592,1	465,9
Ghiaia 15/30	27,0	522,3	2,676	19518		51891,9	0,50	2,6	524,9	52152,7	260,8
Pietrisco	0,0	0,0	0,000	0		0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
dosaggio additivo - %	1	2,1				2,10			2,10	2,10	
dosaggio fumi Silice - %	0	0									
massa totale		2314,0				192584,5			2314,0	192584,5	

**Allegato 7**

Numero Prelievo	Numero Provino	Data getto	Data prova	Res. Unitaria	Resistenza	(Rn - Rm)	(Rn - Rm) <sup>2</sup>
				provino (Rn) (N/mm <sup>2</sup> )	media prelievo (N/mm <sup>2</sup> )		
1	C1/1	18/05/2002	19/06/2002	26,79	26,61	1,26	1,59
	C1/2	18/05/2002	19/06/2002	26,42		-0,89	0,80
2	C2/1	18/05/2002	17/06/2002	25,79	26,03	0,26	0,07
	C2/2	18/05/2002	17/06/2002	26,26		0,74	0,54
3	C3/1	18/05/2002	17/06/2002	25,06	25,45	-0,47	0,22
	C3/2	18/05/2002	17/06/2002	25,84		0,31	0,09
4	C4/1	18/05/2002	19/06/2002	23,32	23,79	-2,21	4,89
	C4/2	18/05/2002	19/06/2002	24,25		-1,27	1,62
5	C5/1	18/05/2002	19/06/2002	28,00	28,00	2,47	6,09
	C5/2	18/05/2002	19/06/2002	28,00		2,47	6,10
6	C6/1	18/05/2002	17/06/2002	24,11	23,83	-1,42	2,01
	C6/2	18/05/2002	17/06/2002	23,55		-1,98	3,91
7	C7/1	18/05/2002	19/06/2002	27,62	25,80	2,10	4,39
	C7/2	18/05/2002	17/06/2002	23,97		-1,56	2,44
8	C7/2	18/05/2002	19/06/2002	26,79	28,01	1,26	1,58
	C8/1	18/05/2002	17/06/2002	29,23		3,70	13,67
9	C8/2	18/05/2002	17/06/2002	25,81	27,26	0,28	0,08
	C9/1	18/05/2002	19/06/2002	28,71		3,18	10,13
10	C9/2	18/05/2002	19/06/2002	28,16	28,00	2,63	6,93
	C10/1	18/05/2002	17/06/2002	27,84		2,31	5,33
11	C10/2	18/05/2002	17/06/2002	28,00	25,92	2,47	6,12
	C11/1	18/05/2002	19/06/2002	23,84		-1,68	2,84
12	C11/2	18/05/2002	19/06/2002	23,97	25,52	-1,56	2,42
	C13/1	18/05/2002	17/06/2002	27,07		1,54	2,36
13	C13/2	18/05/2002	17/06/2002	26,05	23,81	0,52	0,27
	C15/1	18/05/2002	19/06/2002	21,57		-3,95	15,63
14	C15/2	18/05/2002	19/06/2002	22,51	25,88	-3,02	9,09
	C16/1	18/05/2002	19/06/2002	29,25		3,72	13,86
15	C16/2	18/05/2002	19/06/2002	28,69	28,58	3,16	9,99
	C17/2	18/05/2002	19/06/2002	28,47		2,94	8,66
16	C17/2	18/05/2002	19/06/2002	29,61	24,90	4,08	16,67
	C18/1	18/05/2002	19/06/2002	20,18		-5,34	28,55
17	C18/2	18/05/2002	19/06/2002	19,78	20,18	-5,74	32,99
	C19/1	18/05/2002	19/06/2002	20,58		-4,95	24,52
18	C19/2	18/05/2002	19/06/2002	20,43	20,18	-5,10	25,98
	C20/1	18/05/2002	17/06/2002	19,93		-5,59	31,28
19	C20/2	18/05/2002	17/06/2002	19,56	24,55	-5,97	35,61
	C21/1	18/05/2002	19/06/2002	29,55		4,02	16,15
20	C21/2	18/05/2002	19/06/2002	29,46	29,46	3,93	15,43
	C22/1	18/05/2002	17/06/2002	26,16		0,63	0,40
21	C22/2	18/05/2002	17/06/2002	24,99	26,65	-0,54	0,29
	C23/1	18/05/2002	17/06/2002	28,32		2,79	7,79
22	C23/2	18/05/2002	17/06/2002	27,11	23,95	1,58	2,51
	C24/1	18/05/2002	19/06/2002	20,79		-4,74	22,46
23	C24/2	18/05/2002	19/06/2002	20,74	24,17	-4,79	22,90
	C25/1	18/05/2002	17/06/2002	27,60		2,07	4,30
24	C25/2	18/05/2002	17/06/2002	27,38	27,34	1,85	3,42
	C26/1	18/05/2002	17/06/2002	27,30		1,77	3,13
25	C26/2	18/05/2002	17/06/2002	27,18	26,00	1,65	2,71
	C27/1	18/05/2002	17/06/2002	24,82		-0,71	0,51
26							
27							
<b>CAMPIONI INSERITI</b>				<b>Res. Media Rm (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Res.Min (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Sommatoria (Rn - Rm)<sup>2</sup></b>	
50				25,53	19,56	441,34	
					<b>Res. Max (N/mm<sup>2</sup>)</b>		
					29,61		

CLASSE RESISTENZA DICHIARATA (N/mm <sup>2</sup> )	Resistenza media (Rm) (N/mm <sup>2</sup> )	Coefficiente teorico (k)	Scarto quadratico medio (s)	<b>R<sub>ck</sub> di prova (N/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>20,0</b>	25,53	1,64	3,00	<b>20,61</b>

5. *Indagine sclerometrica - Valutazione delle curve di regressione.*

Per la stima della resistenza a compressione del campionamento ottenuto occorre disporre di una correlazione analitica tra il parametro non distruttivo (l'indice sclerometrico I) e quello distruttivo alla pressa (R) che caratterizza il calcestruzzo. La curva così ottenuta è detta di regressione di R/I perché R è stimato per mezzo di I. La migliore interpolante dei dati ottenuti è rappresentata dall'applicazione dei minimi quadrati, assumendo una correlazione del tipo

$$R = a \times I^b \quad (1)$$

con (a,b costanti da determinare sperimentalmente).

La determinazione delle costanti **a** e **b** si consegue passando ai logaritmi cioè linearizzando, attraverso un opportuno cambiamento di variabili, l'equazione non lineare (1) per descrivere il legame tra il parametro distruttivo e quello non distruttivo.

Dalla (1) si trae:

$$\log R = \log a + b \log I = f(a,b) \quad (2)$$

La differenza tra il valore reale di R e quello ottenuto a mezzo della relazione precedente rappresenta lo scarto delle osservazioni R ed I. Esse sono i risultati degli errori sperimentali che si assumerà distribuiti secondo la legge di Gauss. I valori più attendibili di I ed R si possono ora ottenere dal principio della massima verosimiglianza. Per una serie di osservazioni (R<sub>i</sub>, I<sub>i</sub>) essi sono quelli che rendono tale serie più probabile. Tale probabilità diventa massima quando è minima la somma dei quadrati degli scarti (principio dei minimi quadrati). Il problema consiste, dunque, nel rendere minima la grandezza

$$\Sigma (\log R_i - \log a - b \log I_i)^2 = \min \quad (3)$$

ovvero

$$\frac{\partial}{\partial a} \Sigma [(\log R_i - \log a - b \log I_i)^2] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \Sigma [(\log R_i - \log a - b \log I_i)^2] = 0$$

il che conduce al sistema che fornisce i valori di **a** e di **b**.

Le due equazioni che compongono il sistema sono note come equazioni normali della retta dei minimi quadrati.

Introducendo il cosiddetto coefficiente di determinazione dei valori stimati

$$S^2 = \left[ 1 - \frac{\Sigma (R_{ci} - R_{vi})^2}{\Sigma (R_{ci})^2 - \frac{(\Sigma R_{ci})^2}{n}} \right] \quad (0 < S^2 < 1) \quad (5)$$

dove

$R_{ci}$  è la  $i^{ma}$  resistenza valutata sperimentalmente (N/mm<sup>2</sup>),

$R_{vi}$  è la  $i^{ma}$  resistenza valutata con la formula di correlazione  $R = a \times I^b$  (N/mm<sup>2</sup>),

$n$  è il numero dei campioni esaminati.

quanto più ( $S^2$ ) si approssima all'unità tanto più risultano minimi gli errori commessi con la (1).

Nel caso in esame, utilizzando un noto programma di biblioteca, sono stati calcolati i valori di  $a$  e  $b$  per  $\alpha = -90^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$  e  $\alpha = +90^\circ$ .

#### 6. *Indagine ultrasonica - Valutazione della curva di correlazione.*

La curva di correlazione è basata sulla misura della locale velocità di transito degli impulsi ultrasonori.

I provini cubici, oltre al trattamento di cui al paragrafo 5, sono stati connessi alle superfici delle sonde ultrasoniche attraverso l'interposizione di grasso sintetico al fine di evitare la presenza di aria la cui impedenza acustica avrebbe provocato un'elevata attenuazione del segnale. Inoltre, per ottenere una lettura stabile del tempo di transito, la sonda emittente e quella ricevente sono state collocate in posizione fissa tramite apposita dima di accoglimento del provino.

E' stato utilizzato un rilevatore ad ultrasuoni digitale costituito da un generatore di impulsi, da un oscilloscopio e da due sonde da 50 KHz ciascuna.

Alla sonda è stata applicata una pressione costante al fine di migliorare la stabilità della lettura del tempo di transito delle onde ultrasonore. La lettura è stata eseguita per trasparenza.

I valori ( $V$ ) delle velocità ottenuti con la prova ultrasonora sono stati utilizzati per determinare la curva di regressione  $V/R$  utilizzabile per stimare la resistenza ( $R$ ) del conglomerato. Si è assunta una correlazione del tipo

$$R = c \times e^{dV}$$

dove i valori  $c$  e  $d$  sono stati calcolati mediante l'applicazione del metodo dei minimi quadrati e con procedimento analogo a quello già illustrato nel paragrafo 5.

#### 7. *Metodo combinato - Valutazione delle curve di regressione.*

Com'è noto questo metodo combina i risultati dell'indagine sclerometrica con quella ultrasonica. Pertanto, rispetto ai risultati dei singoli metodi non distruttivi, conduce ad una precisione superiore nella determinazione della resistenza del calcestruzzo. L'indagine sclerometrica, com'è noto, è influenzata dalle caratteristiche locali dello strato corticale del calcestruzzo, mentre quella ultrasonora risente delle caratteristiche interne del materiale (dosaggio, forma e dimensione degli aggregati, additivi, contenuti di umidità, presenza di barre di armatura). In particolare il grado di umidità e la stagionatura influenzano la velocità di transito degli ultrasuoni con un effetto opposto a quanto si rileva

per le prove sclerometriche. Il che rende le due prove complementari. Con il metodo combinato viene praticamente annullata sui risultati dell'analisi l'influenza dell'umidità e del grado di maturazione del calcestruzzo, il che porta ad un incremento notevole della precisione essendo tali parametri difficilmente valutabili in loco. La correlazione che lega la velocità di transito degli impulsi ultrasonori ( $V$ ), l'indice sclerometrico ( $I$ ) e la resistenza ( $R$ ) del calcestruzzo, può assumersi del tipo

$$R = e \times I^f \times V^g \quad (6)$$

dove i valori  $e$ ,  $f$ ,  $g$  vengono ancora determinati mediante il principio dei minimi quadrati.

Dalla (6)

$$\log R = \log e + f \log I + g \log V = f(e, f, g) \quad (7)$$

La differenza tra il valore reale di  $R$  e quello ottenuto a mezzo della relazione precedente rappresenta lo scarto delle osservazioni  $R$  ed  $I$ . Esse sono i risultati degli errori sperimentali che si assumerà distribuiti secondo la legge di Gauss. I valori più attendibili di  $I$  ed  $R$  si possono ora ottenere ancora dal principio della massima verosimiglianza. Per una serie di osservazioni ( $R_i$ ,  $I_i$ ) essi sono quelli che rendono tale serie più probabile. Tale probabilità diventa massima quando è minima la somma dei quadrati degli scarti (principio dei minimi quadrati). Il problema consiste, dunque, nel rendere minima la grandezza

$$\Sigma(\log R_i - \log e - f \log I_i - g \log V_i)^2 = \min \quad (8)$$

ovvero

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial e} \Sigma[(\log R_i - \log e - f \log I_i - g \log V_i)^2] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial f} \Sigma[(\log R_i - \log e - f \log I_i - g \log V_i)^2] &= 0 \quad (9) \\ \frac{\partial}{\partial g} \Sigma[(\log R_i - \log e - f \log I_i - g \log V_i)^2] &= 0 \end{aligned}$$

da cui i valori di  $e$ ,  $f$ ,  $g$ .

La campagna sperimentale è stata effettuata presso il Centro di Ricerca e Sviluppo della DRC srl – Ancona.

Le prove sono state condotte conformemente alle indicazioni delle normative vigenti.

## Bibliografia:

1. Cianfrone. F. – Facaoaru – Studio per l'introduzione in Italia del metodo non distruttivo combinato, per la determinazione in loco della resistenza del calcestruzzo – LIPE L'Industria Italiana Per l'Edilizia nn. 6-7/8, 1979;
2. Di Leo A. – Pascale G. – La stima della resistenza in situ dei calcestruzzi con i metodi non distruttivi – INARCOS - gennaio-febbraio, 1981;
3. Menditto G. ed altri – I metodi non distruttivi basati sull'impulso ultrasonoro e sull'indice di rimbalzo dello sclerometro – L'industria delle costruzioni n° 159, gennaio 1985 pagg. 58÷62;
4. Luigi Meloni – Metodi statistici nell'ingegneria – Editrice Tecnico Scientifica, Pisa 1972;
5. Luigi Vajani – Elementi di statistica – CEDAM, Editrice Padova 1980;
6. Hugh D.Young – Statistical treatment of experimental data – Masson - Editoriale Veschi, Milano 1993;
7. Ballatori Enzo – Statistica e metodologia della ricerca – II<sup>a</sup> edizione – Margiacchi – Galeno Editrice, Perugia 1996.