

# Estimate in situ concrete strength from drill energy

## Stima della resistenza del calcestruzzo attraverso il consumo di energia

D. Pera<sup>1</sup>, A. Brencich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genoa, Genoa, Italy*

<sup>2</sup> *Department of Civil, Chemical and Environmental Engineering, University of Genoa, Genoa, Italy*

**ABSTRACT:** Many in situ testing methods for the estimation of concrete strength need drills in the material. Therefore, before testing the material, a mechanical parameter is already available for estimating its mechanical properties: the drill energy. In this paper the energy needed to drill a hole in concrete is used to estimate concrete strength, taking into account all the factors affecting the measurement. The method is cheap, produces a limited damage to the structure and does not require any additional procedure. /Nella pratica dell'ingegneria la stima della resistenza del calcestruzzo su strutture esistenti è da sempre un aspetto molto delicato inoltre i vari metodi di indagine hanno la necessità di avere come riferimento i valori ottenuti dal carotaggio. In quest'ottica è stata condotta una campagna sperimentale per valutare l'applicabilità di un metodo, per la stima preliminare della resistenza del cls, basato sulla misura dell'energia consumata per praticare un foro. In questo lavoro vengono presentati i risultati delle prove di taratura condotta calcestruzzi con resistenze da 20 a 90 MPa caratterizzati con prove su campioni standard e carote. L'analisi dei diversi fattori che possono alterare il risultato della prova, il basso impatto economico unito ad un danno limitato hanno permesso di evidenziare le potenzialità del metodo.

**KEYWORDS:** concrete strength; MDT test; drill energy / prove in situ; resistenza del calcestruzzo; energia di foratura.

## 1 INTRODUZIONE

La caratterizzazione dei materiali costituenti le strutture esistenti è da sempre un aspetto molto delicato. Quando il materiale in oggetto è il calcestruzzo è noto che la stima della resistenza a compressione sia influenzata da molti fattori come la messa in opera o le diverse condizioni di maturazione. A causa della forte variabilità delle caratteristiche del materiale, anche all'interno di una stessa struttura, i diversi metodi di indagine hanno la necessità di avere un valore di riferimento diretto. La resistenza del calcestruzzo in situ è ottenuta da prove di compressione su campioni estratti dalla struttura ma, tale procedura risulta molto invasiva ed apporta un danno significativo agli elementi strutturali.

Per questo motivo, nell'ottica di avere una migliore conoscenza dell'opera vengono utilizzate, in maniera complementare al carotaggio, diverse tecniche meno distruttive. La scelta del tipo di prova però, è spesso legata più alla facilità di esecuzione ed al suo impatto economico che alla sua affidabilità o precisione.

In questo lavoro vengono presentati i risultati di una campagna sperimentale in cui è stata valutata l'applicabilità di un sistema di stima della resistenza del calcestruzzo basato sul consumo di energia di fo-

rare o di carotaggio. Grazie ad un'estesa sperimentazione ed all'analisi di diversi fattori di influenza è stata possibile ottenere una taratura preliminare del metodo.

I risultati hanno evidenziato le potenzialità di applicazione del metodo che potrebbe essere impiegato dagli operatori nella scelta dell'attrezzatura e delle procedure da utilizzare per la diagnosi. Deve essere considerato infatti che spesso altri test non sono efficaci e/o non possono essere impiegati su calcestruzzi ad alta resistenza.

Inoltre può essere considerato un vantaggio, anche dal punto di vista economico, il fatto che molte pratiche diagnostiche prevedono l'esecuzione di fori (endoscopie, pull-out, stima della profondità di carbonatazione, fissaggio delle attrezzature, ecc.).

## 2 STATO DELL'ARTE

### 2.1 *Primi approcci*

Hirschwald (1908) fu il primo a documentare la possibilità di caratterizzare i materiali naturali attraverso la misura della resistenza alla foratura, tuttavia lo sviluppo di metodi e tecnologie avvenne solo più tardi.

Le potenzialità del criterio vennero colte anche in altri ambiti, ad esempio Hardinge (1949) propose la possibilità di valutare la stratigrafia ossea, analizzandone la resistenza alla penetrazione di un utensile al crescere della profondità.

Tra gli autori che hanno portato il maggior contributo all'applicazione del concetto di resistenza alla foratura è necessario ricordare Chagneau e Levasseur (1989, 1990 e 1992). Il metodo da loro proposto, ed applicato a calcestruzzo, legno e materiali odontoiatrici, era in grado di valutare la stratificazioni dei campioni attraverso la misura della forza impiegata per la foratura con velocità di rotazione e di avanzamento costanti. Il limite principale allo sviluppo del metodo fu dovuto alla complessità del sistema di misura ed acquisizione, poiché con la tecnologia dell'epoca non fu possibile realizzare un'apparecchiatura adatta all'uso in sito.

## 2.2 Basi teoriche ed approcci sperimentali

L'osservazione sperimentale condotta su diversi materiali quali malta, rocce e legno, e alcuni approcci teorici hanno mostrato una dipendenza del consumo di energia dalle caratteristiche del materiale.

Inoltre, le diverse ricerche condotte in questo campo hanno permesso di valutare l'effetto di alcuni fattori sulle grandezze misurate.

Le prime sperimentazioni di Chagneau e Levasseur (1990) hanno guidato alcune scelte fatte per la campagna sperimentale. È stato dimostrato che l'uso della rotopercolazione provochi una riduzione sia resistenza all'avanzamento sia della variabilità della sua misura. L'effetto risulta essere negativo per la valutazione della stratigrafia ma, può essere sfruttato per integrare in maniera più precisa l'area sottesa dalla curva di resistenza che rappresenta l'energia consumata.

È emersa inoltre la necessità osservare l'analisi di influenza dei rapporti geometrici del sistema considerando che come dimostrato da Chiaia (2001), l'uso di una punta di maggior diametro si traduca in un minor consumo di energia per unità di volume.

A sostegno dell'approccio energetico possono essere citati gli studi di Carpinteri e Pugno (2002) che, utilizzando i principi della meccanica della frattura dimostrano la dipendenza del lavoro compiuto per la foratura alle dimensioni caratteristiche del problema ed ai materiali che compongono la miscela di calcestruzzo.

Successivamente è stato dimostrato da Pamplona, Kocher, Sneathage, e Aires Barros (2007) che la resistenza all'avanzamento durante la foratura sia correlata alle caratteristiche del materiale ed in particolar modo alla resistenza a compressione uniassiale.

La trattazione dettagliata dei risultati esula da questo lavoro e viene rimandata ai documenti originali.

Nella sperimentazione proposta nel seguito si farà riferimento all'energia consumata e non alla resistenza all'avanzamento. Questa grandezza, espressa in kWh, permette di ridurre se non eliminare l'effetto di influenza dell'operatore evitando l'uso di strumentazioni costose. A livello teorico si può dimostrare tale affermazione considerando che una foratura eseguita con una maggior forza applicata dall'operatore si traduce in una maggior coppia resistente della strumentazione (aumento di Watt consumati), ma allo stesso modo, si realizza il foro in un tempo minore. Si ottiene di fatto un bilanciamento dei due contributi di tempo e potenza dai quali si ottiene l'energia.

## 3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

I dati presentati nel seguito sono frutto di un'ampia campagna sperimentale condotta con l'obiettivo di ottenere una precisa caratterizzazione del calcestruzzo attraverso diverse prove in sito. Una parte della sperimentazione prevedeva la valutazione di fattibilità di un metodo che, come anticipato, che sfruttasse la misura del consumo di energia per ottenere una stima preliminare della resistenza.

### 3.1 Materiali e campionatura

La taratura della procedura è stata effettuata su campioni di diversa forma e dimensione realizzati con 5 miscele di calcestruzzo di diversa resistenza. Ogni miscela è stata caratterizzata con analisi granulometrica e prove di compressione su provini standard e carote in diverse condizioni di maturazione (Tab.1).

Table 1. Properties of concrete mixture produced / caratteristiche delle miscele prodotte

ID	tipo	a/c	Dmax	Rc(28)	mat.	Rc(t)
Cls	cemento		mm	MPa	gg	MPa
C10	IIBLL32.5R	1,2	17	9,6	1197	18,2
C25	IIBLL32.5R	0,6	16	29,4	1198	42,5
C40	IIBLL32.5R	0,5	16	36,0	1198	51,2
C55	IALL42.5R	0,3	17	55,8	1203	63,5
C70	IALL42.5R	0,3	22,5	74,1	1200	96,7

Dai valori di resistenza ottenuti sono state ricavate le curve di maturazione.

I campioni prodotti sono stati identificati in base alle loro dimensioni come segue:

1. Blocchi 1200x600x350 mm
2. Pilastri 1200x350x350 mm
3. Prismi 250x250x450 e 210x150x450 mm
4. Cubi 150x150x150 mm (std)
5. Cilindri 100x200 mm (std)

### 3.2 Strumentazione

La strumentazione utilizzata è semplice e di facile reperimento ed i costi risultano limitati poiché l'esecuzione di diverse procedure di diagnostica prevede comunque l'uso della quasi totalità degli utensili sottoelencati, per l'impiego dei quali non è necessaria una formazione tecnica di alto livello.

La strumentazione comprende:

- Un wattmetro con un range di misura da 9999 kW/h ad 0.001 W/h. e frequenza 10-99 Hz;
- Un trapano a percussione con potenza di 800 w dotato di punta widia con diversi diametri (10, 15 e 18 mm);
- Un carotiere con potenza di 1050 w, a due velocità (400-800 giri/min a vuoto) sul quale sono state montati utensili diamantati di diverso diametro (55, 110 e 150 mm);
- Un cronometro digitale;
- Un calibro.

### 3.3 Definizione della procedura

Dopo un'attenta analisi della letteratura presente sull'argomento è stata definita una procedura di prova ed una serie di test che permettessero di valutare l'influenza di diversi fattori.

Per quanto riguarda la foratura sono stati identificati i seguenti parametri da misurare:

- Energia consumata
- Tempo di foratura
- Profondità del foro
- Usura della punta (n° di fori eseguiti)

Per quanto riguarda il carotaggio sono stati identificati i seguenti parametri da misurare:

- Energia consumata
- Tempo di carotaggio
- Altezza della carota

Per ottenere un valore univoco di energia consumata nella foratura è stato stabilito di eseguire 10 fori, con roto-percussione per i motivi già citati in precedenza. Il valore di energia misurato viene mediato sui 10 fori e depurato del consumo interno della strumentazione e normalizzato al volume di calcestruzzo asportato. Queste operazioni sono rese possibili grazie alla misura del tempo, del valore di consumo a vuoto e della dimensioni del foro (diametro e profondità).

Per il carotaggio, operazione più dispendiosa, la procedura prevede di eseguire almeno 2 prove da cui ottenere un valore del consumo di energia. La media delle misurazioni viene depurata, come per il caso precedente, dal contributo dovuto ai consumi strumentali e normalizzato alla superficie di taglio totale (misurando diametro del tagliante e altezza del carotaggio).

### 3.4 Fattori di influenza analizzati

Durante la campagna sono stati valutati gli effetti di alcuni parametri che avrebbero potuto alterare i risultati.

#### 3.4.1 Consumo 'interno' della strumentazione

Durante la misurazione del consumo di energia vengono misurati anche i consumi propri della strumentazione, quel consumo cioè, che il trapano e il carotiere avrebbero se azionati senza tagliare o forare. Valutando questi contributi è possibile ottenere il valore (netto) di energia consumata in funzione delle caratteristiche della miscela e dell'usura degli utensili (Tab. 2).

#### 3.4.2 Diametro utensili di taglio e foratura

Durante la sperimentazione l'osservazione dei valori di consumo ottenuti, su uno stesso provino, con punte e tazze diamantate di diverso diametro e a parità di condizioni di usura, ha permesso di valutarne l'effetto sul risultato di prova (Tab. 3 e Tab. 10).

#### 3.4.3 Usura delle punte

La valutazione dell'effetto dell'usura delle punte del trapano è stata possibile confrontando, per ciascuna classe di resistenza, i valori ottenuti con punte nuove, dopo l'esecuzione di 60 fori e dopo più di 200 utilizzi (Tab. 4).

Questa analisi ha permesso di definire una soglia per il numero di utilizzi della punta in modo da non subire un effetto significativo sul risultato di prova.

Per quanto riguarda il carotaggio, i costi elevati degli utensili hanno reso sconveniente adottare questo tipo di approccio.

#### 3.4.4 Stato tensionale degli elementi forati

È noto che l'effetto dello stato tensionale abbia influenza sui risultati di alcune prove in sito. Per questo motivo sono state effettuate prove di foratura su campioni a diversi livelli di carico (stato tensionale nullo e compressione a 10 MPa (Tab. 5).

#### 3.4.5 Direzione di betonaggio

L'effetto della direzione del getto rispetto alla direzione della prova di compressione non è ancora stato definito in maniera rigorosa. In questa campagna tale fattore è stato analizzato in funzione del consumo di energia confrontando i dati ottenuti per forature ortogonali a quelli derivanti da fori eseguiti longitudinalmente alla direzione di betonaggio (Tab. 6/Tab. 6).

#### 3.4.6 Grado di compattazione del getto

È naturale pensare che un foro eseguito su un materiale che presenta un maggior numero di vuoti al suo interno possa far registrare un consumo inferiore di energia. Questo comportamento è stato valutato correlando i valori di massa volumica ottenuti dalle carote estratte dai campioni, a quelle dell'energia

consumata per la foratura (Tab. 7). La produzione di campioni con dimensioni significativamente diverse è stata progettata con lo scopo di ottenere provini aventi differenti gradi di compattazione.

### 3.4.7 Saturazione del calcestruzzo

L'influenza dell'umidità all'interno del calcestruzzo è stata valutata paragonando i risultati ottenuti da prove su campioni asciutti e campioni completamente immersi in acqua per circa 1 anno (Tab.8).

### 3.4.8 Resistenza a compressione

Lo scopo principale della sperimentazione è stato quello di osservare se il consumo di energia misurato per la foratura o il carotaggio del calcestruzzo fosse correlabile con la sua resistenza a compressione. La stima preliminare, ottenuta da questa procedura, consentirebbe di migliorare il progetto delle campagne di indagine su strutture esistenti. Il valore ottenuto potrebbe essere utilizzato per la scelta delle procedure in modo da utilizzare le attrezzature in sicurezza, limitando allo stesso tempo il danno provocato alle strutture (Tab. 9).

## 4 RISULTATI OTTENUTI

### 4.1 Prova di foratura

I dati di energia riportati nel seguito, ed utilizzati per la correlazione con la resistenza a compressione, sono ottenuti dalla media dei valori misurati per 10 fori e normalizzati al volume di calcestruzzo asportato (dove non specificato si fa riferimento al diametro della punta pari a 15 mm).

#### 4.1.1 Valutazione dei consumi propri strumentali

Misurando i tempi di prova è possibile quantificare il contributo dovuto ai consumi 'interni' della strumentazione. Nel grafico seguente (Fig. 1) è possibile osservare la differenza tra energia totale (lorda) ed energia depurata dal consumo interno del trapano (netta).

Osservando inoltre, i dati ottenuti (Tab. 2) emerge come la differenza percentuale tra i due valori sia una grandezza costante. L'energia netta è utile nell'ottica di poter applicare le tarature ottenute a procedure condotte con altre attrezzature in quanto risultano depurate dall'effetto strumentale. Inoltre considerando che la differenza tra i due valori risulta essere costante si può affermare che la tendenza di correlazione sia univoca.

Inoltre, la strumentazione utilizzata per la campagna sperimentale non è mai cambiata per cui nel seguito del documento si farà riferimento a valori di energia lorda.

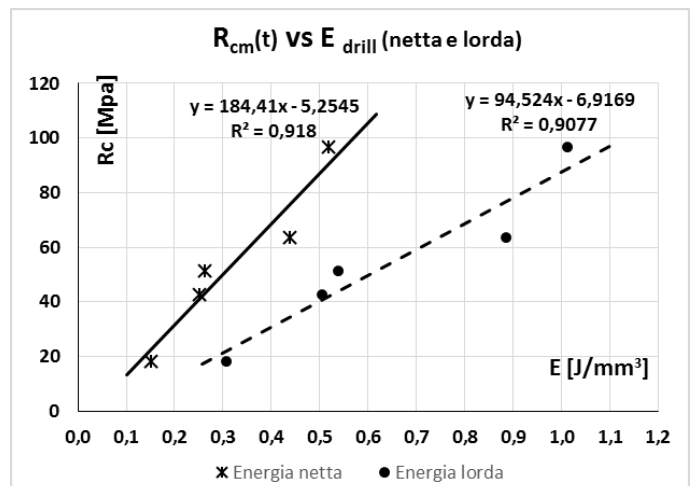


Figure 1. Comparison between net and gross energy / confronto tra energia netta ed energia lorda consumata per la foratura

Questo permette una più facile distinzione tra le classi come si può notare dal grafico precedente.

Table 2. Comparison between net and gross energy / confronto tra energia netta ed energia lorda consumata per la foratura

ID	Rc(28) MPa	Rc(t) MPa	fcar(t) MPa	Netta		$\Delta$ %
				$E_m$ J/mm <sup>3</sup>	$E_m$ J/mm <sup>3</sup>	
C10	9,6	18,2	16,5	0,150	0,306	51
C25	29,4	42,5	40,7	0,251	0,504	50
C40	36,0	51,2	48,0	0,262	0,539	51
C55	55,8	63,5	63,7	0,438	0,885	51
C70	74,1	96,7	76,0	0,518	1,012	49

#### 4.1.2 Effetto della dimensione delle punte

Le trattazioni derivanti dai concetti di meccanica della frattura indicano la fondamentale importanza di considerare le dimensioni caratteristiche del problema. Nella procedura di foratura il fattore di scala dipende dalle dimensioni relative tra inerti ed utensile perforante. I dati ottenuti (Tab. 3) eseguendo la prova con punte di diverso diametro confermano che utilizzando punte di diametro maggiore il consumo di energia risulta più basso.

Lo schema in figura 2 rappresenta in maniera molto semplice la spiegazione del fenomeno descritto nel seguito.

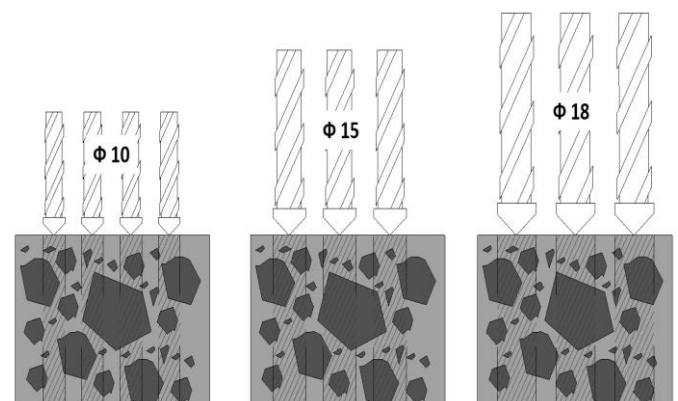


Figure 2. Model of drilling with a different diameter bits / schema di foratura con punte di diverso diametro

Il risultato può essere facilmente chiarito considerando che una punta di minor diametro abbia una maggior probabilità di attraversare zone in cui è presente solo materiale lapideo (più resistente della matrice cementizia).

Table 3. Consumption of energy with different drill bits/ valori di energia consumata con punte di diverso

Diametro della punta		Φ10		Φ15		Φ18	
ID	Dmax	Rc(28)	Rc(t)	fcar(t)	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	mm	MPa	MPa	MPa	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	17	9,6	18,2	16,5	0,677	0,677	0,425
C25	16	29,4	42,5	40,7	0,914	0,784	0,678
C40	16	36,0	51,2	48,0	0,862	0,742	0,644
C55	17	55,8	63,5	63,7	0,972	0,846	0,790
C70	22,5	74,1	96,7	76,0	1,285	1,023	0,960

#### 4.1.3 Effetto dell'usura degli utensili

Per valutare l'influenza dello stato di usura delle punte sono stati messi a confronto, per ogni classe di resistenza, le misure di consumo di energia ottenute con punta nuova, con punta dopo l'esecuzione di 60 fori, ed con punta molto usurata (più di 200 utilizzi).

Table 4. Consumption of energy with different wear condition of drill bits/ valori di energia consumata con punte con diverso livello di usura

Numero di utilizzi della punta		0-10		60-70		>200	
ID	Rc(28)	Rc(t)	fcar(t)	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	MPa	MPa	MPa	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	9,6	18,2	16,5	0,506	0,506	0,633	0,633
C25	29,4	42,5	40,7	0,702	0,753	0,784	0,784
C40	36,0	51,2	48,0	0,661	-	0,742	0,742
C55	55,8	63,5	63,7	0,780	0,869	0,846	0,846
C70	74,1	96,7	76,0	0,901	0,961	1,023	1,023

Come si evince dai valori riportati in tabella 4, il consumo di energia aumenta in maniera significativa con l'aumento dello stato di usura della punta e lo fa in maniera più marcata al crescere della classe di resistenza.

Questo fattore è molto importante nell'ottica di definire di una procedura unificata nella quale dovrebbe essere posto un limite nel numero degli utilizzi per evitare errori nella stima della resistenza del calcestruzzo.

#### 4.1.4 Effetto dello stato tensionale

Le analisi di influenza di questo parametro sono state condotte valutando l'energia consumata per la foratura di uno stesso campione (per ciascuna classe di resistenza) sia stato tensionale nullo che con un livello di compressione assiale di 10 MPa.

Dai dati (Tab.5) emerge come l'effetto della compressione sull'elemento non abbia un'influenza significativa sui risultati di prova per la procedura proposta.

Table 5. Consumption of energy with different stress state/ valori di energia consumata per diversi stati tensionali

Livello di compressione		0 MPa		10MPa		
ID	Dmax	Rc(28)	Rc(t)	fcar(t)	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	mm	MPa	MPa	MPa	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	17	9,6	18,2	16,5	0,550	0,565
C25	16	29,4	42,5	40,7	0,784	0,653
C55	17	55,8	63,5	63,7	0,891	0,846
C70	22,5	74,1	96,7	76,0	1,022	1,023

#### 4.1.5 Effetto della direzione di betonaggio

I risultati riportati nella tabella seguente (Tab. 6) mostrano come la direzione di prova, rispetto alla direzione di getto dell'elemento, non alteri in maniera univoca e significativa il consumo di energia. Per questo motivo i valori di riferimento per le correlazioni proposte nel seguito del documento saranno ottenuti dalla medie delle prove nelle due direzioni.

Table 6. Consumption of energy with different direction of test on different specimens/ energia consumata per diverse direzioni di prova per i diversi campioni

Campione		Blocco		Pilastro		Prisma	
ID	Rc(t)	E <sub>m</sub> (l)	E <sub>m</sub> (⊥)	E <sub>m</sub> (l)	E <sub>m</sub> (⊥)	E <sub>m</sub> (l)	E <sub>m</sub> (⊥)
Cls	MPa	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	18,2	0,506	0,489	0,462	0,559	0,550	0,576
C25	42,5	0,702	0,699	0,698	0,784	0,784	0,777
C40	51,2	0,661	0,701	0,769	0,742	0,742	0,673
C55	63,5	0,780	0,763	0,837	0,891	0,891	0,824
C70	96,7	0,901	0,848	1,041	0,928	1,022	1.116

#### 4.1.6 Compattazione del getto

È lecito ipotizzare che, a parità di miscela, ad un getto meno compattato corrisponda un minor consumo di energia dovuto alla maggior presenza di vuoti d'aria inglobati. Realizzando campioni di diverse dimensioni è stato possibile analizzare l'effetto di questo parametro. Il livello di compattazione avviene attraverso il calcolo della massa volumica dei campioni delle carote estratte. Da queste è stato ricavato un valore diretto di resistenza dei campioni da paragonare sia al consumo di energia che alla resistenza a compressione dei campioni standard.

I dati (Tab.7) confermano quanto ipotizzato, cioè che per campioni di dimensioni più contenute è più facile raggiungere un miglior grado di compattazione.

Table 7. Consumption of energy for different density and specimens/ energia consumata per diversi campioni con diverse masse volumiche

Blocco		Pilastro			Prisma				
ID	ρ <sub>m</sub>	f <sub>m,car</sub>	E <sub>m</sub>	ρ <sub>m</sub>	f <sub>m,car</sub>	E <sub>m</sub>	ρ <sub>m</sub>	f <sub>m,car</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	kg/m <sup>3</sup>	MPa	J/mm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	MPa	J/mm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	MPa	J/mm <sup>3</sup>
C10	2185	16,5	0,497	2201	14,1	0,509	2200	16,5	0,563
C25	2238	37,0	0,700	2238	32,2	0,740	2270	40,7	0,780
C40	2235	46,9	0,681	2265	45,9	0,773	2277	48,0	0,707
C55	2219	49,9	0,772	2233	42,7	0,809	2290	63,7	0,858
C70	2281	58,2	0,875	2300	56,1	0,984	2350	76,0	1,069

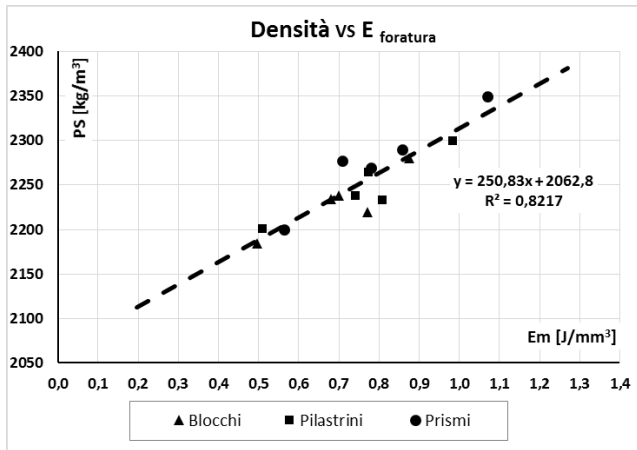


Figure 3. Density- Energy Correlation / correlazione tra energia e densità del calcestruzzo

Il grafico (Fig. 3) mostra la funzione di interpolazione dei dati dalla quale si può osservare la correlazione tra densità dei diversi campioni ed energia consumata per la loro foratura.

#### 4.1.7 Effetto della presenza di umidità

Per osservare se la presenza di umidità all'interno del calcestruzzo avesse effetto sul consumo di energia di foratura sono state eseguite prove su campioni in condizioni asciutte e in condizioni sature (provini immersi in vasca per circa un anno).

I dati riportati nel seguito (Tab. 8) mostrano una netta differenza tra le diverse condizioni, come può essere osservato qualitativamente dal grafico (Fig. 4), dove le linee di interpolazione dei dati mostrano un andamento sostanzialmente parallelo.

L'assenza di valori relativi alle classi più alte (C55 e C70) è dovuta al fatto che, per queste miscele la permanenza non è stata sufficiente a portare a completa saturazione i campioni.

Table 8. Comparison between dry and saturated specimens / confronto tra energia consumata su campioni asciutti e saturi

ID Cls	Rc(28) MPa	Rc(t) MPa	fcar(t) MPa	Asciutto		$\Delta$ %
				$E_m$ J/mm <sup>3</sup>	$E_m$ J/mm <sup>3</sup>	
C10	9,6	18,2	16,5	0,506	0,306	40
C25	29,4	42,5	40,7	0,753	0,504	33
C40	36,0	51,2	48,0	0,778	0,539	31

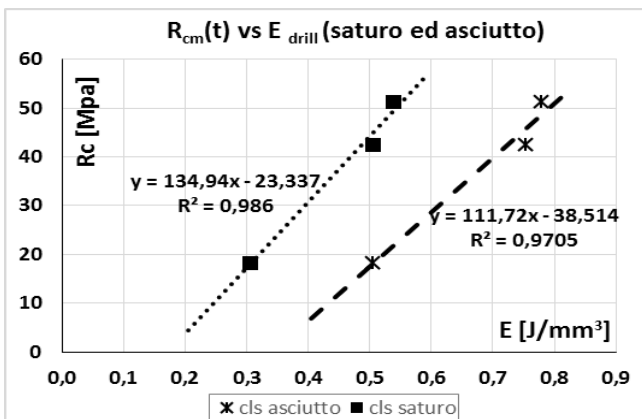


Figure 4. Consumption of energy with different moisture content / energia di foratura per diverse condizioni di saturazione

#### 4.1.8 Effetto della resistenza

Per ogni campione è stato ricavato un valore medio di resistenza a compressione e uno di energia di foratura (Tab. 9). Nel grafico di Figura 5 sono riportati i dati e la curva che ne approssima la tendenza dei valori. L'equazione della curva può essere considerata la funzione di correlazione tra resistenza a compressione del calcestruzzo e l'energia consumata ad essa corrispondente.

Table 9. Consumption of energy and strength of concrete/ energia consumata e resistenza a compressione del calcestruzzo

ID Cls	Blocco		Pilastro		Prisma		$E_M$ J/mm <sup>3</sup>	Cov %
	Rc(t) MPa	$f_{m,car}$ MPa	$f_{m,car}$ MPa	$E_m$ J/mm <sup>3</sup>	$f_{m,car}$ MPa	$E_m$ J/mm <sup>3</sup>		
C10	18,2	16,5	14,1	0,509	16,5	0,563	0,523	6,7
C25	42,5	37,0	32,2	0,740	40,7	0,780	0,740	5,4
C40	51,2	46,9	45,9	0,773	48,0	0,707	0,721	6,6
C55	63,5	49,9	42,7	0,809	63,7	0,858	0,813	5,3
C70	74,1	58,2	56,1	0,984	76,0	1,069	0,976	10

Anche per la resistenza cubica media è stata ricavata la correlazione con l'energia, in figura 6 è indicata attraverso le barre di errore la variabilità dei dati.

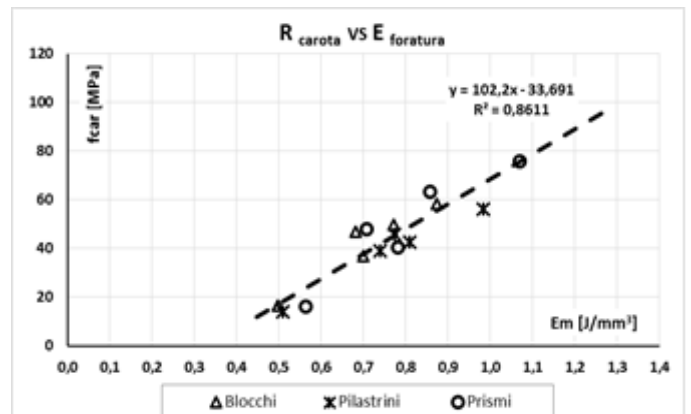


Figure 5. Correlation between core strength and consumption of energy / correlazione tra resistenza ed energia di foratura

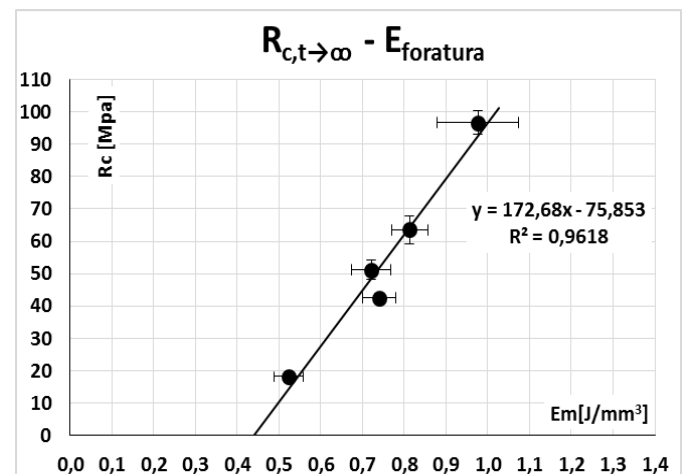


Figure 6. Correlation between cubic strength and consumption of energy / correlazione tra resistenza cubica ed energia di foratura

Si può osservare che per valori elevati della resistenza la deviazione standard dei valori di energia cresce in maniera significativa, tuttavia deve essere considerato che le miscele con tali resistenze sono al di fuori della normale distribuzione commerciale.

#### 4.2 Prova di carotaggio

I dati di energia utilizzati per ottenere le formule di correlazione sono, in questo caso, normalizzati all'area di taglio (circonferenza dell'utensile x profondità di carotaggio) e depurati dai consumi a vuoto della strumentazione. In questo caso, visti i costi e la grande invasività della procedura, sono stati ridotti i parametri di influenza analizzati rispetto alla prova di foratura. Le tazze diamantate utilizzate hanno diametri di

Le considerazioni che possono essere fatte riguardano le dimensioni degli utensili (carotaggi con diametro di 55, 100 e 150 mm) e le condizioni di compattazione dei campioni (prove sui campioni menzionati in precedenza). Inoltre vista la durata delle operazioni di carotaggio e le sue modalità di esecuzione per cui molto spesso l'avanzamento viene interrotto, si è rilevata una grande influenza dei consumi a vuoto e dell'operatore.

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i dati più significativi, in tabella 10 sono riportati i valori ottenuti per i campioni denominati Blocchi ed in tabella 11 quelli relativi ai Prismi. Il grafico in figura 7 mette a confronto i risultati per una più facile comprensione del fenomeno.

Table 10. Consumption of energy and strength of concrete for Blocchi sample/ energia consumata e resistenza a compressione del calcestruzzo per i Blocchi

Blocchi				Φ55	Φ100	Φ150
ID	Rc(t)	f <sub>m,car</sub>	ρ <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	MPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	18,2	16,5	2185	1,31	1,91	1,93
C25	42,5	37,0	2238	1,94	2,66	3,19
C40	51,2	46,9	2235	1,83	3,45	3,33
C55	63,5	49,9	2219	2,40	3,75	3,73
C70	74,1	58,2	2281	3,46	4,58	6,91

Table 11. Consumption of energy and strength of concrete for Prismi sample/ energia consumata e resistenza a compressione del calcestruzzo per i Prismi

Prismi				Φ100
ID	Rc(t)	f <sub>m,car</sub>	ρ <sub>m</sub>	E <sub>m</sub>
Cls	MPa	MPa	kg/m <sup>3</sup>	J/mm <sup>3</sup>
C10	18,2	16,5	2200	3,41
C25	42,5	37,0	2270	3,80
C40	51,2	46,9	2277	4,12
C55	63,5	49,9	2290	4,80
C70	74,1	58,2	2350	6,26

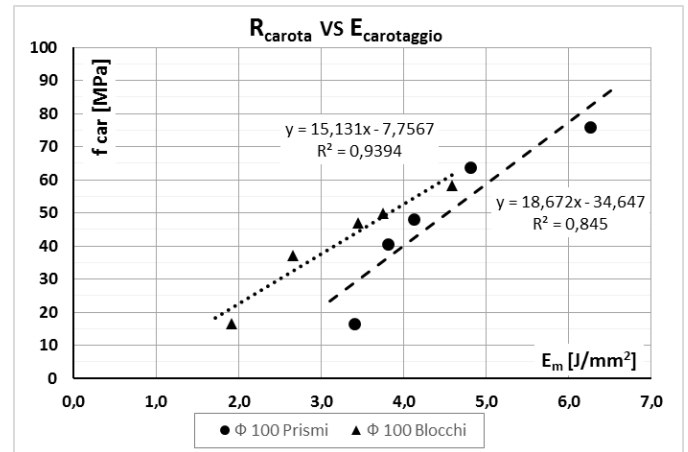


Figure 7. Correlation between core strength and consumption of energy / correlazione tra resistenza della carota ed energia di foratura

Può essere subito osservato che, al contrario di quanto succedeva per la foratura, il consumo degli utensili di diametro maggiore è superiore. In questo caso infatti una tazza di maggior diametro ha maggior possibilità di incontrare sul suo percorso zone in cui sono presenti gli inerti.

Dal grafico si può notare come la maggior densità del calcestruzzo, legata ad una migliore compattazione per i campioni prismatici, comporti un maggior consumo di energia per una stessa miscela, come osservato per la prova di foratura.

## 5 CONCLUSIONI

The experimental campaign allowed to collect the data to evaluate the efficacy of the proposed method. The concrete strength estimation method measuring the drill-energy consumption has provided interesting results which may be summarized as follows:

1. The compressive strength of concrete is related to drill-energy and accuracy in the estimation depends on the procedure and the choice of equipment.
2. The test is very cheap (other investigative procedures still have drilling) and produces a limited damage.
3. The most influencing factors are the wear of the tools, the degree of compaction and saturation.
4. The core drilling is essential for the calibration of the resistance and its density.
5. The measurement of energy consumed for coring is influenced by the same parameters, but shows strong limitations related to the execution mode.
6. To propose a standard method and accurate correlations is necessary to do more detailed experimental campaigns.

La campagna sperimentale ha permesso di raccogliere i dati necessari a valutare l'efficacia del metodo proposto. Il sistema di stima della resistenza del calcestruzzo attraverso la misura dell'energia consumata per la foratura ha fornito indicazioni interessanti che possono essere riassunte come segue:

1. La resistenza a compressione del calcestruzzo è correlata all'energia di foratura e la precisione dipende dalla procedura e dalla scelta dell'attrezzatura.
2. La prova è molto economica (altre procedure di indagine prevedono comunque la foratura) e produce un danno limitato.
3. I fattori che maggiormente influiscono sui risultati sono l'usura degli utensili, il grado di compattazione e saturazione.
4. Il carotaggio è fondamentale per la taratura della resistenza e della massa volumica.
5. La misurazione di energia consumata per il carotaggio è influenzata dagli stessi parametri, ma mostra forti limiti legati alla modalità di esecuzione.
6. Per proporre un metodo standardizzato e curve di correlazione precise è necessaria una sperimentazione più approfondita.

Tiano, P. & Viggiano, A. (2000). A new diagnostic tool for the evaluation of the hardness of natural and artificial stones. *Int J Restoration Build Monuments* 2000;6(5):555–66.

## RINGRAZIAMENTI

Il progetto e la realizzazione della campagna sperimentale sono state condotte grazie al supporto della ditta di calcestruzzi Farina, alla BOVIAR s.r.l. ed al Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del dipartimento DICCA dell'università di Genova.

## REFERENCES

- Carpinteri, A. & Pugno, N. (2002). A fractal comminution approach to evaluate the drilling energy dissipation. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 26:499–513. DOI:10.1002/nag.209
- Chiaia, B. (2001). Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter. *Int J Solids Struct.* 38:7747–7768.
- Chagneau, F. & Levasseur, M. (1989). Contrôle des matériaux de construction par dynamostratigraphie. *Mater. Struct.* 22 (1989) 231. 0025-5432/89 @RILEM
- Chagneau, F. & Levasseur, M. (1990). Caractérisation des propriétés mécaniques du bois par dynamostratigraphie. *Mater. Techn.* 5 (1990) 23-29.
- Chagneau, F. & Levasseur, M. (1992). Dynamostratigraphy, a new type of mechanical test. *Materials and Structures*, 1992, 25, 239-247. 0025-5432/92 @RILEM
- Hardinge, M.G. 1949. Determination of the strength of the cancellous bone in the head of the femur. *Surg. Gynec. Obstet.* 89 (1949) 439.
- Hirschwald, J. (Ernst & Sohn) 1908. Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit, Berlin.
- Pamplona, M., Kocher, M., Sneathlage, R. & Aires Barros, L. (2007). Drilling resistance: overview and outlook. *Z. dt. Ges. Geowiss.* 158: 665–676, Stuttgart.