



Corso di aggiornamento professionale
VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E
VERIFICA SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN C.A.

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Parma
21-23 giugno 2010

LA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI
NELLE STRUTTURE ESISTENTI IN C.A.

Pietro Sciacca
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture
UNIVERSITÀ DI CATANIA

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Il metodo ha come scopo principale la determinazione dei tempi di propagazione di impulsi di vibrazione in campioni o strutture di cls fra una o più coppie di punti di rilievo.

⇒ Scopo dei rilievi è dedurre la velocità di propagazione degli impulsi e da essa informazioni sul cls in termini di caratteristiche meccaniche e omogeneità;

⇒ In combinazione con altre determinazioni il metodo può essere utilizzato per stimare la resistenza del cls in situ;

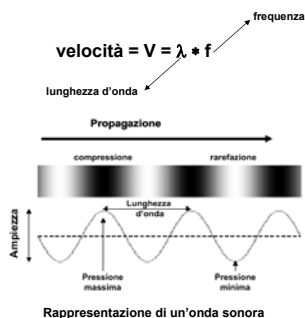
PRINCIPI DEL METODO:

⇒ La velocità con cui le onde elastiche si propagano in un **mezzo omogeneo, elastico e isotropo** è funzione delle sue caratteristiche meccaniche (modulo di elasticità e coefficiente di Poisson dinamici) e della sua densità;

⇒ Analizzando le variazioni di velocità e gli assorbimenti parziali dell'onda dovuti a riflessioni, rifrazioni e attenuazioni secondo determinate direzioni **possono essere indagate le disomogeneità presenti nei getti** (fessure, cavità, etc).

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

- Il suono: una successione di compressioni e rarefazioni delle particelle del mezzo in cui si propaga.
- Gli ultrasuoni: sono onde elastiche in tutto simili a quelle udibili, con frequenza > 20kHz.



Principio del metodo:

Mezzo: elastico, omogeneo, isotropo

Onde: longitudinali

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

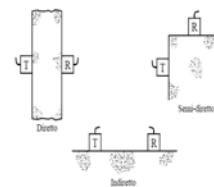
PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)



La sonda trasmittente emette in continuazione, con opportuna cadenza regolabile, impulsi di vibrazione che vengono captati dalla sonda ricevente. Il segnale è elaborato da una apposita unità che calcola il tempo di transito dell'impulso nella struttura.

Operazioni preliminari di prova

- Taratura dei tempi a mezzo blocco di calibrazione;
- Individuazione delle armature;
- Lisciatura delle superfici;
- Impostazione fondo scala e ritmo di ripetizione;
- Tracciamento dei punti di misura;
- Accoppiamento interfaccia sonde-cls con gel o grasso.



PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

ESECUZIONE DELLE PROVE

- Localizzazione dei punti di misura;
- Misura delle distanze "s" tra le coppie di punti [mm] con accuratezza ±1%;
- Misura dei tempi di transito [μs];
- Si calcola $V=s/T$ [m/s];
- Eventuale stima di E_d [MPa];

Risultati di prove ultrasoniche														
Elemento	Identificazione prova				Direz. prova	Punto prova	Ubicazione			Misura			Velocità V	
	Identif. elemento	Corpo scala	Elevaz. fuori terra	dist. long. l [cm]			dist. trav. t [cm]	quota h [cm]	Spesse. s [cm]	Tempo T [μs]	Prima coppia elemento	Media elemento	Media piano	
Pilastro 50x30	P1	App. B	II	Trav.	Punto 1	11	-----	120	29.6	88.2	3352	3274	3122	
Pilastro 50x30	P1	App. B	II	Trav.	Punto 2	11	-----	176	29.6	92.6	3197			
Pilastro 50x30	P2	App. B	II	Trav.	Punto 1	14	-----	102	29.8	94.8	3145			
Pilastro 50x30	P2	App. B	II	Trav.	Punto 2	14	-----	160	29.5	95.8	3079	3111		
Pilastro 40x30	P3	App. B	II	Trav.	Punto 1	12	-----	134	30.0	99.2	3024	2981	3469	
Pilastro 40x30	P3	App. B	II	Trav.	Punto 2	12	-----	190	30.0	102.1	2958			
Pilastro 30x30	P4	App. B	IV	Trav.	Punto 1	14	-----	78	30.0	86.1	3484	3456		
Pilastro 30x30	P4	App. B	IV	Trav.	Punto 2	14	-----	150	30.0	87.5	3429			
Pilastro 40x30	P5	App. B	IV	Trav.	Punto 1	13	-----	100	30.0	86.6	3464	3437		
Pilastro 40x30	P5	App. B	IV	Trav.	Punto 2	13	-----	149	30.0	88.0	2409			
Pilastro 30x30	P6	App. B	IV	Trav.	Punto 1	14	-----	90	30.0	85.4	3513	3513		
Pilastro 30x30	P6	App. B	IV	Trav.	Punto 2	14	-----	153	30.0	85.4	3513			

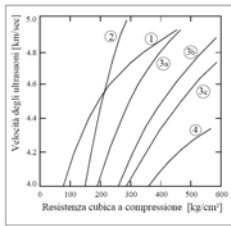
PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Giudizio qualitativo sulle caratteristiche del calcestruzzo

Velocità [m/s]	Giudizio
V<3000	Pessimo
3000<V<3400	Scadente
3400<V<3900	Discreto
3900<V<4500	Buono
V>4500	Ottimo

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Esistono in letteratura curve che correlano la velocità ultrasonica nel cls alla sua resistenza



Correlazioni analitiche V-R_c vari autori

curva 1:
 $R_c = 0.1125 \cdot V^{1.803 \cdot V}$
curva 2:
 $R_c = 24.34 \cdot V^2 - 71.95 \cdot V + 42.73$
curva 3a: $R_c = V^{4.2}$
curva 3b: $R_c = V^{4.5}$
curva 3c: $R_c = V^{3.8}$
curva 4:
 $R_c = 68.334 \cdot 10^{-3} \cdot V^{6.184}$

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Il cls non è un materiale isotropo omogeneo ed elastico, quindi le relazioni che governano il legame delle velocità US alle caratteristiche meccaniche non possono prescindere dalle sue reali proprietà chimico-fisiche, legate:

1. **Dimensione e natura degli inerti:** la presenza di inerti di grande dimensione fa aumentare la velocità anche se la resistenza resta costante;
2. **Rapporto A/C:** poco influente sulla velocità e molto sulla resistenza;
3. **Contenuto di umidità:** al crescere dell'umidità la velocità aumenta fino al 5%, mentre la resistenza diminuisce;
4. **Età:** è inversamente proporzionale alla velocità a causa della microfessurazione, ma direttamente proporzionale alla resistenza;
5. **Stato di sollecitazione:** la velocità non viene influenzata fino a quando la tensione nel materiale supera il 60-70% del carico di rottura, poi inizia a decrescere;
6. **Presenza di armature:** è un'influenza molto significativa, per cui bisogna porre attenzione nel minimizzare tale effetto indesiderato, ponendosi al centro delle maglie.

Da tutto ciò consegue che non è per niente consigliabile utilizzare curve di correlazione predeterminate. **Le curve di correlazione vanno determinate caso per caso.**

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Fattori che influenzano la velocità

⇒ Influenza del tipo di inerti

Gli inerti a densità normale (ghiaia e roccia frantumata) e quelli ad elevata densità hanno un andamento simile della curva V-R_c, mentre gli aggregati leggeri presentano valori di V molto più bassi;

⇒ Influenza del tempo di stagionatura

Una relazione molto conosciuta che lega la Velocità V [km/s] al tempo di stagionatura t [s] è la seguente:

$$V = \alpha + \beta \cdot e^{-\gamma/t}$$

dove

β è funzione del rapporto inerte/cemento;

$\alpha = 1.5$ km/s è la velocità degli US nell'acqua;

γ è funzione del rapporto A/C, del tipo di cemento e condizioni di maturazione

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Fattori che influenzano la velocità

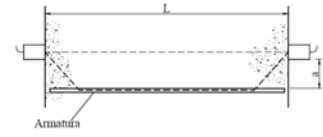
⇒ Influenza delle armature

E' dovuta a un duplice motivo, la maggiore velocità US nell'acciaio e la maggiore compattazione del cls nella zona adiacente le barre;

L'influenza è massima quando l'asse delle armature è parallelo al percorso delle onde US;

Per il calcolo della velocità in tale situazione le norme suggeriscono la relazione:

$$V_c = \frac{2aV_s}{\sqrt{4a^2 + (\tau V_s - L)^2}}$$



V_c = velocità nel cls;

V_s = velocità nell'acciaio;

τ = tempo di transito misurato;

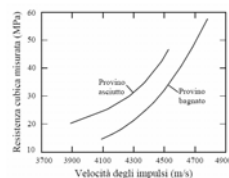
a = distanza tra la barra e lo spigolo della sonda.

PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

⇒ Influenza dell'umidità

Provini saturi mostrano un incremento di velocità US anche > 5%.

Tale influenza si attenua al crescere della resistenza.



Limitazioni d'uso – distanze tra le sonde

⇒ Influenza della dimensione max degli inerti

La distanza minima tra le sonde sarà (BS 4408):

- 150 mm per dimensione max inerti compresa tra 20 e 40 mm;
- 100 mm per dimensione max inerti 20 mm;

⇒ Frequenza delle sonde

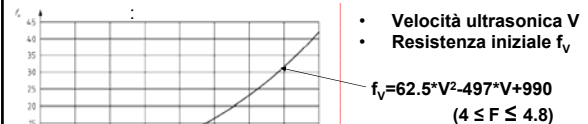
⇒ L'uso di sonde con frequenze elevate (≥ 50 kHz) permette di ottenere misure di tempo accurate su percorsi brevi (<100 mm);

• L'uso di sonde con frequenze basse (<20 kHz) consente di indagare percorsi lunghi minimizzando l'assorbimento del segnale.

PROVE ULTRASONICHE

Stima della resistenza cilindrica in situ

La Normativa europea EN13791 propone una curva base di correlazione tra



- Velocità ultrasonica V
- Resistenza iniziale f_v

$$f_v = 62.5 \cdot V^2 - 497 \cdot V + 990$$

(4 ≤ V ≤ 4.8)

Le prove devono essere eseguite in accordo alla EN 12504-4

Per ciascuna prova (min. 9 prove):

1. Si misura la forza Velocità V

(curva di corr.)

f_v (res. iniziale)

2. Si estraggono carote sui medesimi punti e si eseguono prove di compressione

(in laboratorio)

$f_{c,ls}$ (res. cilindrica in situ)

PROVE ULTRASONICHE

Stima della resistenza cilindrica in situ

Per ciascuna prova si calcola:

$$\delta f = f_{c,ls} - f_v$$

N≥9

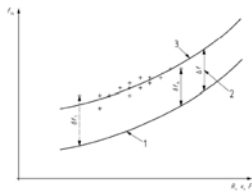
δf_{med} (valor medio)
 δ (dev. standard)

Si determina



$$\Delta f = \delta f_{med} - k_1 \cdot \delta$$

(k_1 diminuisce al crescere di N)
($k_1 = 1.67$ per N=9.....=1.48 per N≥15)



Fattore correttivo con cui traslare la curva di correlazione iniziale

Infine, per avere la stima della **resistenza cilindrica in situ**:

$$f_{c,ls} = f_v + \Delta f$$

METODI COMBINATI - SONREB

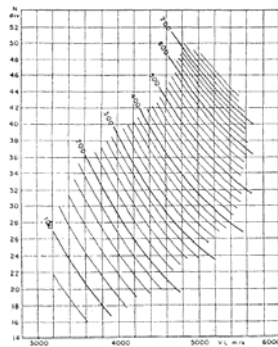
La metodologia utilizza in modo incrociato 2 PND:

SONic + **REBound** = ultrasuoni + sclerometro

1. Il **contenuto di umidità** nel cls fa sottostimare l'indice sclerometrico e sovrastimare la velocità US;
 2. L'**età** al contrario fa sottostimare la velocità US e sovrastimare l'indice di rimbalzo;
- ⇒ L'**uso combinato** di queste 2 prove **consente una compensazione** degli errori legati all'utilizzo delle singole metodologie.
- ⇒ Nel metodo combinato a 2 variabili indipendenti (V e S) la correlazione che si ottiene con la variabile dipendente (R_c) da origine a una distribuzione di punti intorno a una "superficie di interpolazione";
- ⇒ Le curve di correlazione sono del tipo $R_c = a \cdot V^b \cdot S^c$ (1);
- ⇒ Le costanti **a, b, c** dipendono dalle modalità con cui si è condotta la sperimentazione di correlazione.

METODI COMBINATI - SONREB

Esecuzione delle prove e limiti di applicabilità



Correlazione di Cianfrone-Faccaro, 1980

Per ciascuna determinazione della resistenza cubica di una zona di cls:

- Si determina la velocità **V** (media di almeno 2 misure);
- Si determina l'indice di rimbalzo **I** (media di almeno 10 misure);
- Ogni zona risulta caratterizzata da una coppia di valori dei parametri non distruttivi indipendenti (**V, I**) cui viene associato un valore della resistenza **Rc**.

Limiti di applicabilità del metodo:

1. calcestruzzi con strati superficiali degradati;
2. zone con forte concentrazione di armatura;

METODI COMBINATI - SONREB

⇒ In letteratura esistono numerose espressioni del tipo (1), tra le quali

$$1a) \quad R_{c,1} = 9.27 \cdot 10^{-11} \cdot S^{1.4} \cdot V^{2.6}$$

$$1b) \quad R_{c,2} = 8.06 \cdot 10^{-8} \cdot S^{1.246} \cdot V^{1.85}$$

$$1c) \quad R_{c,3} = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot S^{1.058} \cdot V^{2.446}$$

• **R_c** è la resistenza cubica a compressione in [N/mm²];

• **S** è l'indice sclerometrico;

• **V** è la velocità ultrasonica in [m/s]

⇒ Tali espressioni **non hanno validità generale**.

- ⇒ 1a) non vengono forniti limiti di applicabilità;
- ⇒ 1b) ricavata da prove su cls di composizione usuale, non meglio precisata;
- ⇒ 1c) utilizzata per stimare la resistenza su travi in c.a.p., quindi da ritenere applicabile per cls ad alta resistenza.

⇒ In ogni caso le espressioni sopra riportate appaiono di **dubbia affidabilità per cls di qualità medio-bassa, tipici delle strutture esistenti**.

ALTRI METODI NON DISTRUTTIVI

La sonda Windsor

⇒ E' un metodo semi-distruttivo (interessa alcuni centimetri di materiale)

⇒ Principio: una sonda metallica viene infissa mediante una pistola → la **profondità di penetrazione** viene correlata alla resistenza del materiale



⇒ La prova si esegue mediante 3 determinazioni (ASTM C803);

⇒ Dopo aver rimosso i detriti si misurano le profondità di infissione che **non** devono discostarsi di più di 5 mm l'una dall'altra;

ALTRI METODI NON DISTRUTTIVI

La sonda Windsor

⇒ E' un metodo utile per **eseguire dei confronti** di cls simili o per valutare l'**evoluzione temporale** delle caratteristiche di un determinato cls;

⇒ Vantaggi: Il metodo è indubbiamente rapido e **non è influenzato dalle condizioni ambientali**;

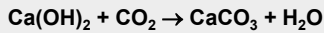
⇒ Il fenomeno che in seguito alla penetrazione provoca la crisi del cls è complesso ed è pertanto **difficile stabilire una corrispondenza tra profondità di penetrazione e resistenza a compressione del materiale**;

⇒ E' **indispensabile eseguire la calibrazione per ogni cls**;

⇒ Altri svantaggi: è abbastanza costoso, e produce un danno significativo.

PROVE CHIMICHE – Attacco dell'anidride carbonica

Col fenomeno della **CARBONATAZIONE** l'anidride carbonica presente nell'aria viene assorbita dal cls, trasformando l'idrossido di calcio (fortemente basico) in carbonato di calcio secondo la reazione



$$12.5 \div 13.5 \xrightarrow{\text{pH}} 9$$

- ⇒ Tale abbassamento del pH determina l'eliminazione della naturale barriera alcalina, formata da uno strato passivante di ossido di ferro insolubile che protegge le armature dai fenomeni ossidativi.
- ⇒ Quando la carbonatazione raggiunge l'armatura interviene un pericolo di corrosione.
- ⇒ Il fenomeno è favorito dalla presenza di umidità.

PROVE CHIMICHE - Carbonatazione

Determinazione della profondità di carbonatazione (UNI 9944)

- ⇒ Su una metà di ciascun provino generalmente già sottoposto alla prova di trazione indiretta, si determina la profondità di carbonatazione.

⇒ Reagente: soluzione di fenolftaleina 1% in alcool etilico



- ⇒ Il reagente, al contatto con materiale il cui pH sia maggiore di 9.2, vira al rosso e rimane incolore per valori di pH minori.

PROVE CHIMICHE - Carbonatazione

Prova di carbonatazione con andamento anomalo della coloritura



- ⇒ La prova è stata eseguita su campione integro;
- ⇒ Si può osservare che entrambi gli estremi del provino sono interessati dalla carbonatazione.
- ⇒ Ciò ha messo in evidenza la presenza di un secondo spessore di cls applicato al pilastro in un tempo successivo alla sua realizzazione, quando il cls originario era già investito dalla carbonatazione.

PROVE CHIMICHE – Attacco dei solfati

Analisi chimica: diffrattometrica dei raggi X

- ⇒ La quantità di ione solfato SO_3 "fisiologica" in una struttura in c.a. è compresa tra 0.4+0.6% del peso del cls;
- ⇒ Il solfato è presente nel cemento come CaSO_4 ;
- ⇒ Normalmente si procede con campionamento di 2 porzioni di cls, una in zona con sospetto di attacco solfatico e l'altra in zona sicuramente non attaccata;
- ⇒ Se dalle analisi la quantità di solfato nella zona di presunto attacco risulta maggiore del 20-30% l'ipotesi può essere confermata;
- ⇒ L'analisi chimica non è in grado di stabilire il livello di degrado ma solo se la concentrazione supera quella fisiologica;
- ⇒ Il degrado si manifesta solo quando si formano quei prodotti (gesso, ettringite) che danno origine a fenomeni espansivi;

PROVE CHIMICHE – Attacco dei cloruri

- ⇒ La quantità "fisiologica" di cloruri in una struttura in c.a. è lo 0.4% del peso del cemento (0.2% per c.a.p.);
- ⇒ Tali quantità sono introdotte con le materie prime dell'impasto;
- ⇒ L'attacco dei cloruri può derivare da esposizione in ambienti marini, provenire dall'esterno (antigelo sui viadotti) o per quantità anomale nell'impasto (CaCl_2 usato in passato come accelerante di presa);
- ⇒ Il fenomeno si manifesta con fessurazione in corrispondenza delle armature e distacco del copriferro;

PROVE CHIMICHE – Attacco dei cloruri

Analisi chimica: diffrattometrica dei raggi X

- ⇒ Si campionano 2 porzioni di cls, una in zona con sospetto di attacco dei cloruri e l'altra in zona sicuramente non attaccata;

Analisi colorimetrica: alla fluorescina

- ⇒ Si spruzzano su una carota 2 soluzioni:
 - 1 soluzione di fluorescina;
 - 1 soluzione di nitrato di argento.
- ⇒ Si osservano le colorazioni assunte dal materiale:

Colorazione **CHIARA** (rosa) \Rightarrow **ZONA PENETRATA**;
Colorazione **SCURA** \Rightarrow **ZONA NON PENETRATA**;

INDAGINI SUGLI ACCIAI

Nelle strutture esistenti è spesso necessario disporre o integrare i dati esistenti circa:

- ⇒ Quantità e distribuzione delle armature nelle sezioni;
- ⇒ Caratteristiche meccaniche dell'acciaio e stato di conservazione;
- ⇒ A tal fine si eseguono:
 - Rilievi in situ;
 - Prelievo di campioni;
 - Prove di laboratorio
- ⇒ La determinazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio per c.a. risulta in genere meno problematica circa l'interpretazione dei risultati, in quanto i valori forniti dalle prove di trazione sono meno dispersi rispetto ai cls, specie in termini di tensione di rottura;

PROVE SU ACCIAI

Le barre di acciaio prelevate vengono sottoposte a prova di trazione secondo UNI EN 15630/1 e si determinano le grandezze:

- ⇒ Diametro della sezione resistente;
- ⇒ Carico unitario di snervamento;
- ⇒ Carico unitario di rottura;
- ⇒ Allungamento dopo rottura.

In passato, fino agli anni '70, erano in uso gli acciai lisci.

PROVE SU ACCIAI – vecchia classificazione

Per dare indicazioni sulle qualità di acciaio in cui ci si può imbattere procedendo a campagne sperimentali su edifici esistenti bisogna fare riferimento alle normative del passato:

- ⇒ Il **R.D. 2229 del 1939** classificava gli acciai da costruzione sulla base delle tensioni di snervamento e rottura nei tipi **dolce, semiduro, duro**;
- ⇒ La **circolare 1472 del 1957** riproponeva la medesima classificazione assegnando le sigle **Aq42, Aq50, Aq60** agli acciai di qualità caratterizzati dalle seguenti caratteristiche

Tipo acciaio	Tensione di snervamento [kg/mm ²]	Tensione di rottura [kg/mm ²]	All ₁₀ spec. a rottura [%]
Aq42	≥23	42+50	≥20
Aq50	≥27	50+60	≥16
Aq60	≥31	60+70	≥14

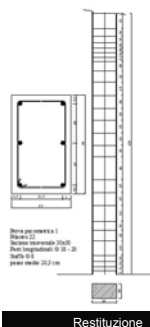
PROVE SU ACCIAI – Rilievo delle sezioni

La posizione delle barre nelle travi e nei pilastri viene determinata attraverso il metodo pacometrico che si basa sul principio dell'induzione magnetica.

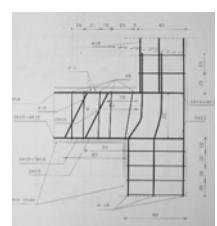
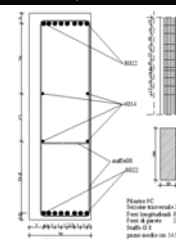
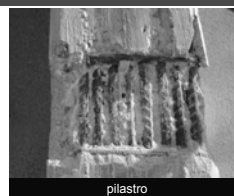
- ⇒ Gli strumenti in commercio consentono la **localizzazione molto accurata** della posizione barre e del copriferro;
- ⇒ L'incertezza sulla determinazione del diametro è di circa 2 diametri per strumenti di ultima generazione;
- ⇒ Solitamente si procede alla determinazione a mezzo **saggio diretto dei diametri in alcune sezioni** significative;
- ⇒ Per barre molto ravvicinate o disposte su più file si deve procedere con saggi diretti;
- ⇒ E' spesso molto importante rilevare oltre alle armature principali di travi e pilastri anche i dettagli nelle zone di sovrapposizione e nei **nodi trave-pilastro**;

PROVE SU ACCIAI – Rilievo delle armature

Rilievo a mezzo pacometro



PROVE SU ACCIAI – Rilievo diretto delle armature



PROVE SU ACCIAI – Prelievo di barre

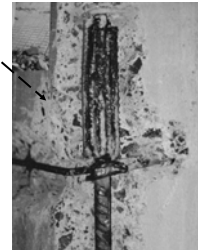
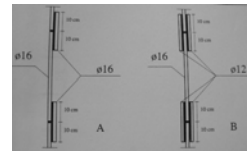
Prelievo di armature non emergenti

Fasi operative

- ⇒ Localizzazione a mezzo pacometro delle armature;
- ⇒ Individuazione dei prelievi (per armature longitudinali solitamente si prelevano quelle d'angolo);
- ⇒ Rimozione del copriferro per una lunghezza superiore a quella di prelievo;
- ⇒ Taglio della barra (min. 40÷50 cm);
- ⇒ Prelievo e catalogazione del campione;
- ⇒ Ripristino della sezione resistente di acciaio mediante saldatura di spezzoni di acciaio dello stesso tipo e di diametro uguale o superiore a quello prelevato;
- ⇒ Ricostituzione dello strato di copriferro con malte cementizie per ripristino strutturale (tixotropiche ad alta resistenza e ritiro compensato).

PROVE SU ACCIAI – Prelievo di barre

Prelievo di armature longitudinali e trasversali e ripristino



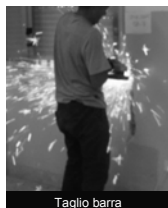
PROVE SU ACCIAI – Prelievo di barre – sequenza fasi



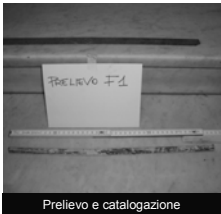
Rimozione copriferro



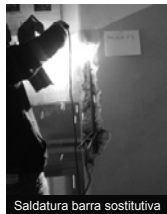
Messa a nudo barra



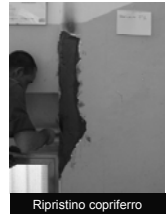
Taglio barra



Prelievo e catalogazione



Saldatura barra sostitutiva



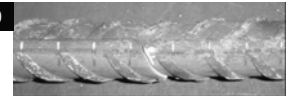
Ripristino copriferro

PROVE SU ACCIAI - Trazione

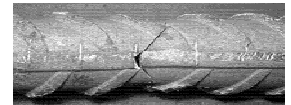
Rotture di tipo fragile



P6



P10



P2

Contrassegno	Data prova	Φ eff.	RESISTENZA A TRAZIONE		All. Rott. A _s
			Tensione di snervamento	Tensione di rottura	
		[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
Prelievo P6	17/01/03	17,73	476,76	744,94	8,89
Prelievo P10	"	19,76	492,31	770,44	13,20
Prelievo P2	"	19,86	483,00	772,79	16,60

PROVE SU ACCIAI - Trazione

Acciai prelevati da un ponte in c.a. degli anni '60



Contr.	DATA PROVA	D eff.	RESIST. A TRAZIONE		All. rott. [%]
			Tensione di snerv. f _y	Tensione di rott. f _t	
		[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
A3	10/10/03	29,82	482,0	673,4	10,60
P A4	10/10/03	25,84	419,8	662,4	17,85
A5 C5	10/10/03	25,53	484,1	643,6	non rilevabile
A6 C6	10/10/03	19,80	434,0	666,5	18,21
A2	10/10/03	13,79	445,6	655,7	11,50
P1 A1	10/10/03	9,60	430,1	610,1	14,00

CASO DI STUDIO

IMPIEGO DI TECNICHE COMBinate - Edifici esistenti in c.a.

- ❑ **CASO DI STUDIO:** caratterizzazione del calcestruzzo in opera di edifici multipiano in c.a. attraverso un metodo di stima indiretto delle proprietà meccaniche.

- ❑ **METODOLOGIA:** impiego di tecniche combinate PD – PND.

- ❑ **TARATURA DEL METODO:**
 1. Prove di laboratorio su N campioni prelevati.
 2. PND lungo l'asse dei campioni prima e dopo il prelievo.
 3. Determinazione di Curve di Correlazione.

- ❑ **ESTENSIONE DELLE INDAGINI:**ad un numero di elementi » N.

INTRODUZIONE – scelta dell'indagine PND

....Ricordando l'O.P.C.M. 3274:

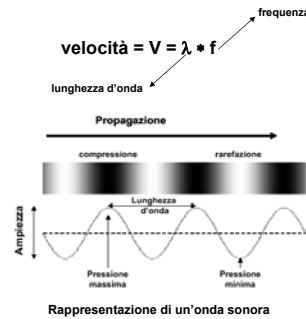
- ☐ La misura delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.
- ☐ Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli distruttivi, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive.
- ☐ Vanno adottati metodi non distruttivi che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza del calcestruzzo.

Indagine non distruttiva individuata: ULTRASUONI

- ☐ Buona rappresentatività
- ☐ Nessun danno
- ☐ Affidabilità e ripetibilità
- ☐ Legame con le proprietà elastiche

IL RILIEVO ULTRASONICO

- ☐ Il suono: una successione di compressioni e rarefazioni delle particelle del mezzo in cui si propaga.
- ☐ Gli ultrasuoni: sono onde elastiche in tutto simili a quelle udibili, con frequenza > 20kHz.



Principio del metodo:

Mezzo: elastico, omogeneo, isotropo

Onde: longitudinali

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

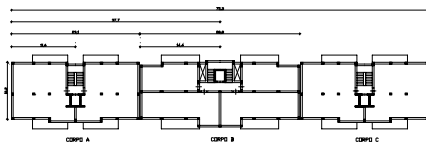
Edifici oggetto di indagine



Edificio 1



Edificio 2



Schema planimetrico degli edifici

- ☐ Tipologia: Edifici in c.a. con 5 elev. f.t.
- ☐ Località: Siracusa.
- ☐ Costruzione: anni '80.
- ☐ Proprietà: IACP SR.
- ☐ 3 corpi indipendenti per edificio.
- ☐ Sup. corpi laterali A e C: 250 m²/impalcato.
- ☐ Sup. corpo centrale B: 305 m²/impalcato.
- ☐ Sup. complessiva: 800 m²/impalcato.
- ☐ N°appartamenti/imp.: 8 per edificio.

FASE DI TARATURA – programma di indagine

in situ

- ☐ Rilievo della velocità di propagazione V_{situ} delle onde longitudinali su N°18 elementi strutturali.
- ☐ Prelievo di N°18 carote di cls, lungo l'asse di rilievo delle velocità US.

in laboratorio

- ☐ Rilievo della velocità V_{car} su N°18 provini cilindrici ricavati dalle carote prelevate, con rapporto h/d=2.
- ☐ Esecuzione di N°18 prove di compressione monoassiale con rilievo della curva $\sigma-\epsilon$.

RICERCA DI
CORRELAZIONI tra V_{situ} e

- ☐ Densità ρ
- ☐ Resistenza cilindrica f_c
- ☐ Resistenza cubica R_c
- ☐ Modulo elastico E_0

Elementi strutturali indagati nella Fase di Taratura

Edificio	Corpo	Elevaz. I	Elevaz. II	Elevaz. III	Elevaz. IV	Elevaz. V	Totale
2	B	3	---	3	---	3	9
1	B	3	---	3	---	3	9

FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio



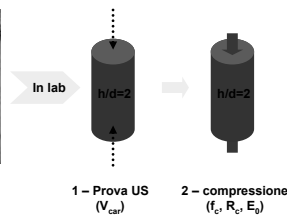
Fasi di prova per il rilievo della velocità V_{situ}

Prove ultrasoniche in situ

- ☐ Sonde: piezoelettriche f=50 kHz.
- ☐ Taratura: blocco di calibrazione
- ☐ Visualizzazione: A-scan
- ☐ Misure di distanza: precisione $\pm 1\%$.
- ☐ Modalità: per trasparenza.



Fasi di estrazione di un campione



FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio

RISULTATI - confronto velocità

Elemento	Carotaggio	Elevaz. f.t.	V_{situ} [m/s]	V_{car} [m/s]	V_{car}/V_{situ}
Pilastro 40x40	C1	I	3875	3810	0,98
Pilastro 40x40	C2	I	3903	3875	0,99
Pilastro 40x40	C3	I	3681	3554	0,97
Pilastro 40x30	C4	III	3571	3259	0,91
Pilastro 40x30	C5	III	3450	3345	0,97
Pilastro 40x30	C6	III	3450	3238	0,94
Pilastro 30x30	C7	V	2884	2823	0,98
Setto 150x30	C8	V	2989	2760	0,92
Setto 150x30	C9	V	3023	3037	1,00
Pilastro 50x40	C10	I	3705	3582	0,97
Pilastro 50x40	C11	I	3672	3635	0,99
Pilastro 40x40	C12	I	3854	3715	0,96
Pilastro 30x40	C13	III	3622	3617	1,00
Pilastro 50x30	C14	III	3937	3720	0,94
Pilastro 50x30	C15	III	3563	3529	0,99
Pilastro 30x30	C16	V	3772	3647	0,97
Pilastro 30x30	C17	V	3454	3425	0,99
Pilastro 30x30	C18	V	3706	3659	0,99

FASE DI TARATURA – prove di laboratorio RISULTATI – prove di compressione strumentate

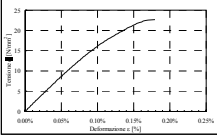


Diagramma σ - ϵ

$$f_c \rightarrow R_c = 2.5 f_{t,d} / (1.5 + \phi/h) \quad (BS1881)$$

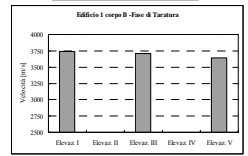
Car.	ϕ [mm]	ρ [kg/m ³]	Res. Cil. f_c [N/mm ²]	Res. cub. R_c [N/mm ²]	Mod. elast. E_c [N/mm ²]
C1	104	2038	22.7	28.1	17850
C2	104	2035	22.4	28.0	16950
C3	104	2001	21.5	26.7	15600
C4	79	2001	18.9	23.2	12450
C5	104	2007	18.8	23.3	12900
C6	79	2010	17.3	21.2	11500
C7	79	1920	12.5	15.6	8200
C8	79	1882	12.4	15.2	8700
C9	79	1919	14.3	17.6	11000
C10	104	2008	22.5	27.9	15050
C11	104	2001	22.8	28.2	16850
C12	79	1990	20.9	25.9	17400
C13	79	2042	20.1	24.7	16450
C14	104	2020	24.1	28.9	16900
C15	104	1981	19.3	24.0	14300
C16	104	2017	17.8	22.1	16950
C17	79	2008	20.1	24.7	12450
C18	104	2050	20.6	24.3	17000

FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio RIEPILOGO DEI RISULTATI

Edificio 1

Grandezza	I elev.		III elev.		V elev.		I-III-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
V_{sit} [m/s]	3744	0.11	3707	0.05	3644	0.05	3698	0.04
V_{lab} [m/s]	3644	0.01	3622	0.03	3577	0.04	3614	0.03
ρ [kg/m ³]	2000	0.00	2014	0.02	2025	0.01	2013	0.01
f_t [N/mm ²]	22.1	0.05	21.1	0.12	19.5	0.08	20.9	0.09
R_c [N/mm ²]	27.3	0.05	25.9	0.10	23.7	0.06	25.6	0.09
E_c [N/mm ²]	16430	0.07	15880	0.09	15330	0.16	15880	0.10

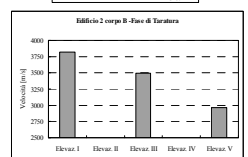
Velocità media V_{sit}



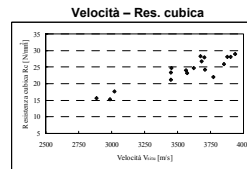
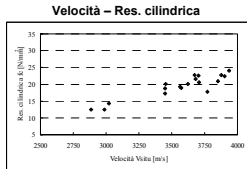
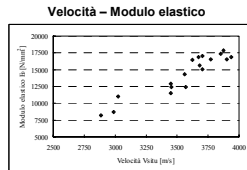
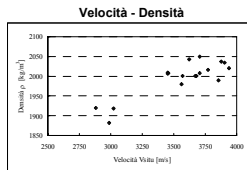
Edificio 2

Grandezza	I elev.		III elev.		V elev.		I-III-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
V_{sit} [m/s]	3820	0.03	3491	0.02	2965	0.02	3425	0.11
V_{lab} [m/s]	3747	0.05	3281	0.02	2873	0.05	3300	0.12
ρ [kg/m ³]	2024	0.01	2006	0.00	1907	0.01	1979	0.03
f_t [N/mm ²]	22.2	0.03	18.3	0.05	13.1	0.08	17.9	0.23
R_c [N/mm ²]	27.6	0.03	22.5	0.05	16.0	0.08	22.1	0.23
E_c [N/mm ²]	16670	0.07	12280	0.06	9300	0.16	12750	0.26

Velocità media V_{sit}

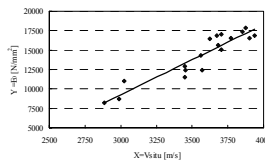


FASE DI TARATURA – correlazioni DIAGRAMMI DI DISPERSIONE



FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio CORRELAZIONI

- ☐ Al fine dell'elaborazione statistica dei dati sono stati accorpati i risultati delle prove sui 2 edifici.
- ☐ Dall'interpolazione dei punti sperimentali, sono state determinate le rette di regressione dei minimi quadrati di Y su X.
- ☐ X è sempre la velocità, misurata in situ.
- ☐ Y è la generica grandezza ricercata: ρ , f_c , R_c , E_c



$$Y = a \cdot X + b$$

- ☐ V_{sit} [m/s]- ρ [kg/m³]
- ☐ V_{sit} [m/s]- f_c [N/mm²]
- ☐ V_{sit} [m/s]- R_c [N/mm²]
- ☐ V_{sit} [m/s]- E_c [N/mm²]

Coeff. di determinazione

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i,sit} - Y_{med})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{med})^2}$$

$$\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{med})^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{i,sit})^2 + \sum_{i=1}^N (Y_{i,sit} - Y_{med})^2$$

Varianza totale Varianza residua Varianza spiegata

FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio CORRELAZIONI – limiti di confidenza

$$s_{Y,X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{stim})^2}{N}}$$

errore standard della stima di Y su X

N<30

$$s_{Y,X} = s_{Y,X} \cdot \sqrt{N/(N-2)}$$

errore standard della stima corretto

...Nell'ipotesi di distribuzione normale dei punti campionari attorno alla retta di regressione.....

$$Y_{1,2}^{(1s)} = a \cdot X + b \pm s_{Y,X}$$

Le 2 rette parallele alla retta di regressione a distanza verticale $\pm s_{Y,X}$ racchiudono circa il 68% della popolazione.

$$Y_{1,2}^{(2s)} = a \cdot X + b \pm 2s_{Y,X}$$

Le 2 rette parallele alla retta di regressione a distanza verticale $\pm 2s_{Y,X}$ racchiudono circa il 95% della popolazione.

$$Y_{1,2}^{(3s)} = a \cdot X + b \pm 3s_{Y,X}$$

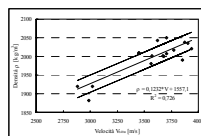
Le 2 rette parallele alla retta di regressione a distanza verticale $\pm 3s_{Y,X}$ racchiudono circa il 99% della popolazione.

FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio CORRELAZIONI – riepilogo

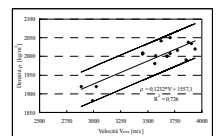
$$Y = a \cdot X + b$$

Grandezza	a	b	s	s'	R ²
ρ [kg/m ³]	0.1232	1957.1	23.077 [kg/m ³]	24.477 [kg/m ³]	0.7260
f_t [N/mm ²]	0.0101	-16.637	1.318 [N/mm ²]	1.398 [N/mm ²]	0.8411
R_c [N/mm ²]	0.0123	-19.946	1.674 [N/mm ²]	1.776 [N/mm ²]	0.8338
E [N/mm ²]	9.0142	-17790	1072.447 [N/mm ²]	1137.502 [N/mm ²]	0.8718

Velocità - Densità



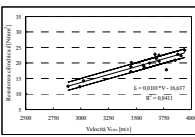
$\rho_{stim} \pm 1s$



$\rho_{stim} \pm 2s$

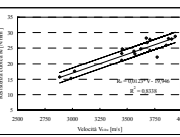
FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio CORRELAZIONI - riepilogo

Velocità – Resistenza cilindrica



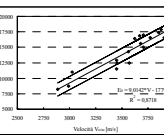
$f_{c,stim} \pm 1s$

Velocità – Resistenza cubica

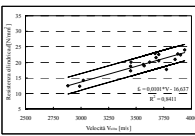


$R_{c,stim} \pm 1s$

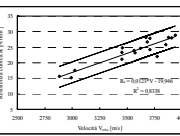
Velocità – Modulo elastico



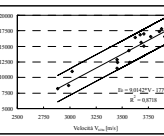
$E_{0,stim} \pm 1s$



$f_{c,stim} \pm 2s$



$R_{c,stim} \pm 2s$



$E_{0,stim} \pm 2s$

FASE DI ESTENSIONE – prove in situ programma di indagine

- La fase di estensione dell'indagine non distruttiva ha interessato complessivi n°240 punti di misura distribuiti su n°82 elementi strutturali nei 2 edifici.
- Utilizzando le correlazioni stabilite sono state determinate le stime delle grandezze di interesse: *Densità, Resistenza cilindrica e cubica, Modulo elastico*.
- Per ciascun elemento strutturale le prove sono state eseguite a 2 differenti altezze.
- Su 21 pilastri al V impalcato dell'edificio 1 e su 17 pilastri agli impalcati I-V dell'edificio 2 le prove sono state eseguite in due direzioni ortogonali.
- Non è stato possibile eseguire prove sui corpi "A" e "B" dell'Edificio 2.
- Per ciascuna grandezza sono stati valutati i valori medi per elemento strutturale, per impalcato, per edificio.

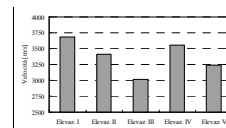
Edificio	Corpo	Elev. I	Elev. II	Elev. III	Elev. IV	Elev. V	Totale
2	C	4	6	6	6	6	28
1	A	3	3	3	3	9	21
1	B	-----	3	-----	3	6	12
1	C	3	3	3	3	9	21
							82

FASE DI ESTENSIONE – prove in situ Raccolta dei dati

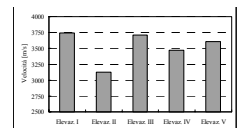
Palazzina 1 - corpo A Elevazioni I-V - Data misure: 14/09/06

Elemento	Identif. elemento	Corpo scala	Elevaz. fuori terra	Direz. prova	Punto prova	Ubicazione		Spes. s.	Tempi T	Prova singola	Velocità V	
						dist. long. [m]	dist. trav. [m]				Media elemento [m/s]	Media piano [m/s]
Pilastro 40x40	P1	App. A	I	Trav.	Punto 1	13	-----	88	29.8	105.6	3769	3739
Pilastro 40x40	P1	App. A	I	Trav.	Punto 2	13	-----	167	29.5	106.5	3769	3739
Pilastro 40x40	P2	App. A	I	Long.	Punto 1	13	83	40.5	120.5	3361	3504	3685
Pilastro 40x40	P2	App. A	I	Long.	Punto 2	13	147	40.2	102.2	3648	3504	3685
Pilastro 40x40	P3	App. A	I	Trav.	Punto 1	14	83	29.5	102.7	3648	3813	3813
Pilastro 40x40	P3	App. A	I	Trav.	Punto 2	16	-----	148	29.5	104.5	3780	3813
Pilastro 40x30	P4	App. A	II	Long.	Punto 1	13	87	49.8	114.4	3479	3479	3408
Pilastro 40x30	P4	App. A	II	Long.	Punto 2	-----	-----	-----	-----	-----	3427	3408
Pilastro 40x30	P5	App. A	II	Long.	Punto 1	13	70	39.1	114.1	3427	3427	3408
Pilastro 40x30	P5	App. A	II	Long.	Punto 2	-----	-----	-----	-----	-----	3302	3408
Pilastro 40x30	P6	App. A	II	Long.	Punto 1	13	69	39.1	114.8	3406	3302	3408
Pilastro 40x30	P6	App. A	II	Long.	Punto 2	13	147	38.6	116.3	3319	3302	3408
Pilastro 40x30	P7	App. A	III	Trav.	Punto 1	12	-----	70	29.8	99.5	2995	2973
Pilastro 40x30	P7	App. A	III	Trav.	Punto 2	12	-----	167	29.8	101.6	2995	2973
Pilastro 40x30	P8	App. A	III	Long.	Punto 1	12	60	39.3	126.3	3314	3302	3302
Pilastro 40x30	P8	App. A	III	Long.	Punto 2	14	150	39.2	126.9	3089	3302	3302
Pilastro 40x30	P9	App. A	III	Long.	Punto 1	13	75	39.6	131.9	3002	2986	3559
Pilastro 40x30	P9	App. A	III	Long.	Punto 2	13	160	39.2	132.0	2970	2986	3559
Pilastro 30x30	P10	App. A	IV	Trav.	Punto 1	11	-----	46	28.7	82.2	3613	3571
Pilastro 30x30	P10	App. A	IV	Trav.	Punto 2	10	-----	152	29.5	83.6	3529	3571
Pilastro 30x30	P11	App. A	IV	Long.	Punto 1	13	78	29.3	82.8	3539	3567	3559
Pilastro 30x30	P11	App. A	IV	Long.	Punto 2	14	155	29.2	81.2	3506	3567	3559
Pilastro 30x30	P12	App. A	IV	Trav.	Punto 1	14	-----	79	29.3	82.6	3547	3538
Pilastro 30x30	P12	App. A	IV	Trav.	Punto 2	14	-----	156	29.0	82.2	3528	3538

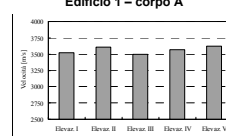
FASE DI ESTENSIONE – riepilogo dei risultati Velocità V_{situ} medie di piano



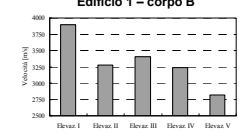
Edificio 1 – corpo A



Edificio 1 – corpo B



Edificio 1 – corpo C



Edificio 2 – corpo C

V [m/s]	I elev.		II elev.		III elev.		IV elev.		V elev.		I-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
Ed. 1 - A	3685	0.04	3408	0.02	3020	0.02	3559	0.01	3245	0.02	3487	0.07
Ed. 1 - B	3744	0.03	3122	0.11	3707	0.05	3469	0.01	3598	0.05	3526	0.07
Ed. 1 - C	3520	0.01	3607	0.02	3494	0.01	3566	0.02	3617	0.02	3561	0.02
Ed. 2 - C	3899	0.05	3274	0.05	3411	0.02	3239	0.04	2820	0.12	3329	0.11
Ed. 2 - B	3820	0.03	-----	-----	3491	0.02	-----	-----	2965	0.02	3425	0.11

FASE DI ESTENSIONE – riepilogo dei risultati

p [kg/m³]	I elev.		II elev.		III elev.		IV elev.		V elev.		I-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
Ed. 1 - A	2011	0.01	1979	0.00	1929	0.00	1996	0.00	1957	0.00	1974	0.01
Ed. 1 - B	2000	0.00	1942	0.01	2014	0.02	1984	0.00	2007	0.01	1989	0.02
Ed. 1 - C	1991	0.00	2001	0.00	1988	0.00	1996	0.01	2003	0.01	1996	0.00
Ed. 2 - C	2037	0.01	1960	0.01	1977	0.00	1956	0.01	1905	0.02	1967	0.02
Ed. 2 - B	2024	0.01	-----	-----	2006	0.00	-----	-----	1907	0.01	1979	0.03

f _c [N/mm²]	I elev.		II elev.		III elev.		IV elev.		V elev.		I-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
Ed. 1 - A	20.6	0.08	18.0	0.14	13.9	0.05	19.3	0.01	16.2	0.04	17.6	0.13
Ed. 1 - B	22.1	0.05	14.9	0.23	21.1	0.12	18.4	0.02	19.5	0.08	19.2	0.13
Ed. 1 - C	18.9	0.02	19.8	0.04	18.7	0.01	19.4	0.04	19.9	0.05	19.4	0.04
Ed. 2 - C	22.8	0.08	16.5	0.09	17.9	0.04	16.1	0.07	11.9	0.28	17.0	0.22
Ed. 2 - B	22.2	0.03	-----	-----	18.3	0.05	-----	-----	13.1	0.08	17.9	0.23

R _c [N/mm²]	I elev.		II elev.		III elev.		IV elev.		V elev.		I-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
Ed. 1 - A	25.4	0.08	22.2	0.03	17.2	0.05	23.8	0.01	20.0	0.04	21.7	0.13
Ed. 1 - B	27.3	0.05	18.5	0.10	25.9	0.10	22.7	0.02	23.9	0.08	23.7	0.13
Ed. 1 - C	23.3	0.02	24.4	0.01	23.0	0.01	23.9	0.04	24.5	0.04	23.9	0.04
Ed. 2 - C	28.0	0.08	20.3	0.09	22.0	0.04	19.9	0.07	14.7	0.28	21.0	0.22
Ed. 2 - B	27.6	0.03	-----	-----	22.5	0.05	-----	-----	16.1	0.08	22.1	0.23

E ₀ [N/mm²]	I elev.		II elev.		III elev.		IV elev.		V elev.		I-V elev.	
	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.	media	c.v.
Ed. 1 - A	15430	0.09	13063	0.04	9437	0.07	14290	0.03	11479	0.05	12740	0.16
Ed. 1 - B	16430	0.07	10360	0.13	15880	0.09	13480	0.03	14740	0.12	14180	0.16
Ed. 1 - C	13940	0.02	14720	0.01	13700	0.01	14350	0.05	14810	0.05	14310	0.05
Ed. 2 - C	17360	0.10	11720	0.11	12960	0.05	11410	0.09	7630	0.39	12210	0.28
Ed. 2 - B	16670	0.07	-----	-----	12280	0.06	-----	-----	9380	0.16	12750	0.26

DENSITÀ

RESISTENZA
CILINDRICA

RESISTENZA
CUBICA

MODULO
ELASTICO

CASO DI STUDIO - CONCLUSIONI

- Dai grafici di dispersione l'ipotesi di distribuzione normale del campione appare confermata.
- Le grandezze appaiono ben correlate con coeff. R² compresi tra 0.73 e 0.87.
- Il metodo appare sensibile per la misura delle variazioni nelle proprietà del materiale.
- Si è osservato in entrambe le fasi dell'indagine un decadimento delle proprietà meccaniche del cls con la quota dell'impalcato nell'edificio 2C con una riduzione max di V del 28% tra il I e il V impalcato.
- Meno eterogenea risulta invece la qualità del cls nell'edificio 1. Le riduzioni max delle velocità medie di piano variano dal 4 % nel corpo C, al 17 % nel corpo B, al 18 % nel corpo A.
- La qualità del cls appare nei 2 edifici abbastanza omogenea per impalcato, mentre significative variazioni si manifestano all'interno del blocco tra un impalcato e l'altro, come si evince dall'analisi dei c.v.
- Si è osservato, in entrambi gli edifici, un decadimento locale delle V, al crescere della quota nell'impalcato, con una riduzione media dal basso verso l'alto del 2% per metro.

CASO DI STUDIO - CONCLUSIONI

- ❑ Nell'indagine qui presentata sono stati estratti complessivamente 18 campioni di cls e sono state eseguite 18+240 prove n.d. complessivamente.
- ❑ Da un'analisi prezzi effettuata il rapporto dei costi di esecuzione della prova n.d. US rispetto ad una p.d. con estrazione del campione, ripristino, esecuzione della sola prova di compressione è pari a 1:8. Per prova strumentata tale rapporto tra PND e PD è 1:15.
- ❑ Nel caso di prove non strumentate, il costo complessivo di un'indagine estesa come in questo lavoro calcolato con riferimento al costo unitario della PD è di $18 \cdot 1 + (18 + 240) \cdot 1/8 \approx 50$.
- ❑ Nel caso di prove strumentate il costo complessivo dell'indagine calcolato con riferimento al costo unitario della PD strumentata è di $18 \cdot 1 + (18 + 240) \cdot 1/15 \approx 35$.
- ❑ Ciò significa che a parità di estrazioni l'indagine combinata diventa più conveniente quando l'obiettivo è la determinazione di più grandezze, in particolare del modulo elastico.