

Corso di aggiornamento

Progettazione strutturale sulla base delle  
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Verifica sismica di edifici esistenti in c.a.**

2 - Indagini sulle strutture in c.a.

Spoletto

25-27 febbraio 2010

Aurelio Gherzi

Si ringrazia l'ing. Piero Sciacca,  
del Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture  
del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale,  
che ha fornito parte delle diapositive di questa presentazione

# Programmazione della campagna di indagini

Obiettivo generale:

- Acquisire un livello di conoscenza migliore possibile, tenendo conto di:
  - Livello minimo di conoscenza necessario
  - Vantaggi forniti da una migliore conoscenza
  - Costi necessari per acquisire questa conoscenza

# Programmazione della campagna di indagini

Fasi preliminari:

- Reperimento del materiale disponibile
- Rilievo geometrico sufficientemente dettagliato

Scopo della campagna di indagini:

- Acquisire informazioni su
  - Dettagli costruttivi  
(quantità e disposizione delle armature in pilastri, nodi, travi)
  - Caratteristiche dei materiali (calcestruzzo e acciaio)

# CAMPIONAMENTO

- ⇒ Aspetto fondamentale nella impostazione della campagna di indagini è costituito dal **CAMPIONAMENTO**, ovvero dalla scelta del **NUMERO E LOCALIZZAZIONE DEI PUNTI** da indagare, sia in termini di distribuzione nella struttura che in termini di localizzazione nei singoli elementi strutturali;
- ⇒ Primo requisito del campionamento: la **RAPPRESENTATIVITA'** dello stato complessivo dell'edificio, in grado di riflettere al meglio la **VARIABILITA' delle caratteristiche strutturali**;
- ⇒ Quanto più la struttura è eterogenea tanto più le indagini devono essere accurate e approfondite per pervenire a una affidabile caratterizzazione dei materiali in opera;
- ⇒ **NON ESISTE IL “NUMERO GIUSTO”** delle indagini da eseguire;
- ⇒ Deve essere valutato **caso per caso**, ed è solitamente un **compromesso ragionevole** tra precisione richiesta, somme e tempi disponibili, invasività consentita.

# CAMPIONAMENTO

- ⇒ La scelta dei punti di indagine deve essere casuale, senza privilegiare zone particolari, magari solamente più comode da raggiungere, per potere quindi ritenere i risultati ottenuti **statisticamente rappresentativi** delle proprietà del materiale in situ;
- ⇒ E' un ottimo modo di procedere, laddove possibile, eseguire una **preventiva campagna di prove non distruttive (PND)** al fine di **individuare zone omogenee** all'interno della struttura, per procedere dunque all'esecuzione mirata delle prove distruttive;
- ⇒ In tal modo, con un **numero di prove distruttive limitato** al numero di ambiti omogenei, si eseguirà la **calibrazione** di uno o più **metodi PND**;
- ⇒ La calibrazione dei metodi PND consente di **estendere** queste ultime, **ad un numero quanto si voglia elevato di punti**.

## Localizzazione negli elementi strutturali

- ⇒ Per ciò che attiene la rappresentatività del campione all'interno dei singoli elementi strutturali, è necessario evitare quelle zone dove il calcestruzzo presenta caratteristiche diverse da quelle medie, come ad esempio si verifica in corrispondenza dei pilastri;
- ⇒ Tipicamente infatti la resistenza varia lungo l'altezza diminuendo dal basso verso l'alto;
- ⇒ Si possono registrare variazioni del 20-30%;
- ⇒ Se non diversamente specificato è preferibile che le prove sui pilastri siano localizzate a metà altezza.

# CAMPIONAMENTO

Per descrivere con sufficiente affidabilità la risposta strutturale di un edificio esistente è necessario disporre di adeguate informazioni sul reale comportamento dei materiali.



# Indagini sulle strutture in c.a.

- **Prelievo di campioni (acciaio, cls)**
- **Prove di laboratorio**
- **Prove in situ.**
- **La fase di indagine sperimentale è solitamente preceduta da una fase di “rilievo statico” della struttura.**

## Casistica ricorrente di indagine

- ⇒ Rilievo statico della struttura (misure geometriche, saggi pacometrici, saggi diretti sulle armature);
- ⇒ Prelievo di campioni di cls a mezzo carotaggio;
- ⇒ Prelievo di barre di armatura;
- ⇒ Prove di laboratorio sui campioni di cls (resistenza a compressione, modulo elastico, resistenza a trazione indiretta, prove chimiche);
- ⇒ Prove di trazione sugli acciai (snervamento, rottura, all.% a rottura);
- ⇒ Prove non distruttive (ultrasuoni, sclerometriche, pull-out, Windsor) in situ, con esecuzione delle stesse preliminarmente negli stessi punti in cui si procederà all'estrazione delle carote, ai fini della taratura delle stesse.
- ⇒ Determinazione di correlazioni tra PD e PND;
- ⇒ Estensione delle PND ad un più elevato numero di elementi strutturali;
- ⇒ Prove di carico su elementi strutturali, orizzontamenti, strutture di fondazione;
- ⇒ saggi in fondazione con pozzetti esplorativi, con determinazione delle dimensioni, estrazione campioni, PND;
- ⇒ sondaggi geognostici e caratterizzazione dei terreni mediante prove di laboratorio.

# SCelta DEL TIPO DI INDAGINE

- ⇒ Le ragioni che conducono alla scelta di una determinata prova piuttosto che a un'altra nascono da valutazioni che attengono alla precisione richiesta, ai costi, ai danni consentiti, e ai tempi di esecuzione;
- ⇒ Spesso la scelta è condizionata dalla possibilità di produrre danni anche se solo di natura estetica;
- ⇒ Per tali limitazioni la scelta si orienta sui metodi non distruttivi, limitando il più possibile quelle distruttive;
- ⇒ Essendo le PND metodi indiretti il loro utilizzo ai fini della valutazione quantitativa della resistenza è molto delicato e **non può prescindere da una FASE PRELIMINARE DI CALIBRAZIONE con metodi distruttivi**;

# SCELTA DEL TIPO DI INDAGINE

- ⇒ Le prove non distruttive sono molto efficaci per finalità comparative;
- ⇒ Sono rapide, economiche e poco invasive;
- ⇒ Se preventivamente calibrate possono essere impiegate con finalità quantitative;

## Confronto dei più diffusi METODI NON DISTRUTTIVI

Metodo	Costo	Rapidità	Danno	Rappresentatività	Affidabilità
Carotaggio	Alto	Bassa	Alto	Buona	Ottima
Sclerometro	Minimo	Molto Alta	Nulla	Superficiale	Scarsa
Ultrasuoni	Medio	Media	Nulla	Buona	Moderata
Pull-out	Medio	Media	Moderato	Superficiale	Moderata
Sonda Windsor	Medio	Alta	Minimo	Superficiale	Scarsa

## La normativa precisa:

- ⇒ 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.

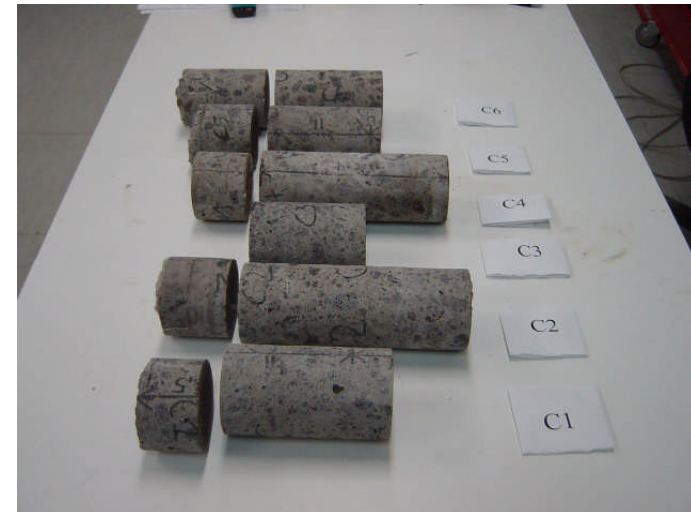
**Metodo:** prelievo di campioni cilindrici di cls indurito mediante carotarici a corona diamantata.

- ⇒ E' un metodo distruttivo molto efficace se utilizzato in appoggio ai metodi non distruttivi per la determinazione della resistenza in situ del cls.
- ⇒ Le carote estratte vengono catalogate, ispezionate, preparate mediante spianatura o rettifica e sottoposte alle prove di laboratorio utilizzando procedimenti normalizzati.
- ⇒ La resistenza misurata sulle carote risente di numerosi fattori che la differenziano da quella misurata su provini standard confezionati durante il getto.

## Prelievo

- ⇒ La localizzazione dipende dalle finalità delle prove.
- ⇒ Criterio fondamentale da adottare nel corso delle operazioni di estrazione è ridurre al minimo il danneggiamento;
- ⇒ Un adeguato posizionamento della carotatrice è indispensabile per estrarre campioni regolari, con sezione costante e asse perfettamente rettilineo;
- ⇒ I danni intrinseci alla modalità di estrazione sono legati alla coppia torcente esercitata dal carotiere, alla direzione di perforazione, all'età di stagionatura, alla dimensione dell'inerte.

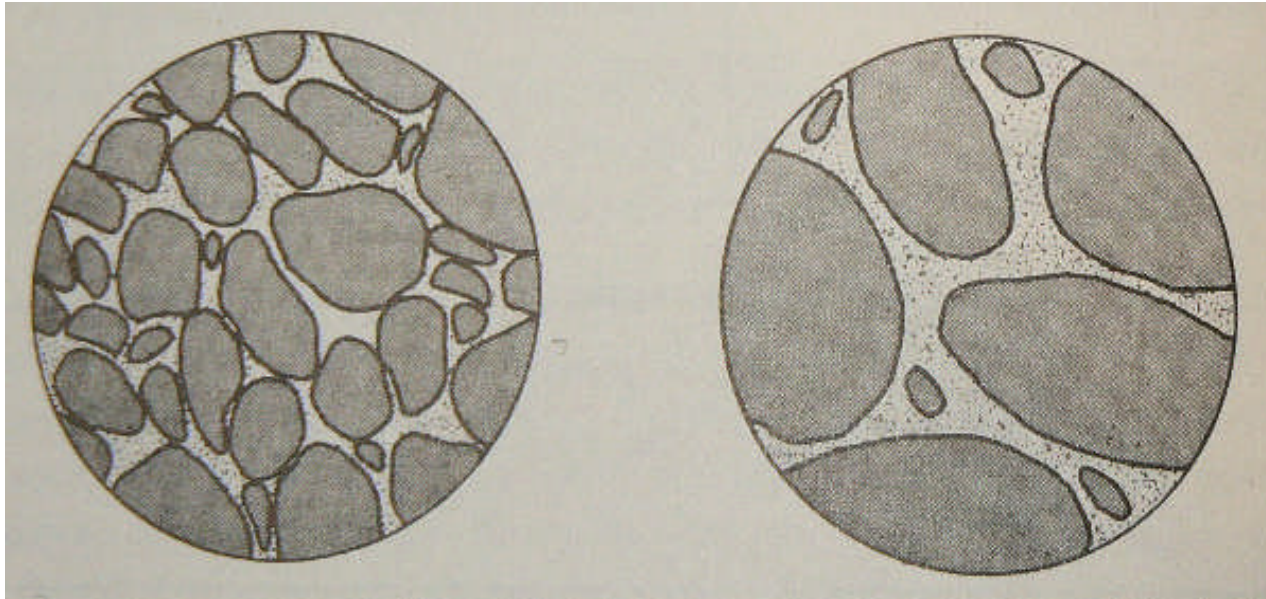
# CAROTAGGIO



## Diametro delle carote

- ⇒ E' un parametro molto influente sulla resistenza.
- ⇒ Usualmente è compreso tra i 50 e i 150 mm;
- ⇒ Deve essere  $\geq 3$  volte la max dimensione dell'inerte;
- ⇒ Elementi di disturbo quali nidi di ghiaia, inclusione di armature, vibrazioni, possono influenzare significativamente un piccolo volume.
- ⇒ Risultati affidabili si ottengono da campioni di medio-grande diametro.

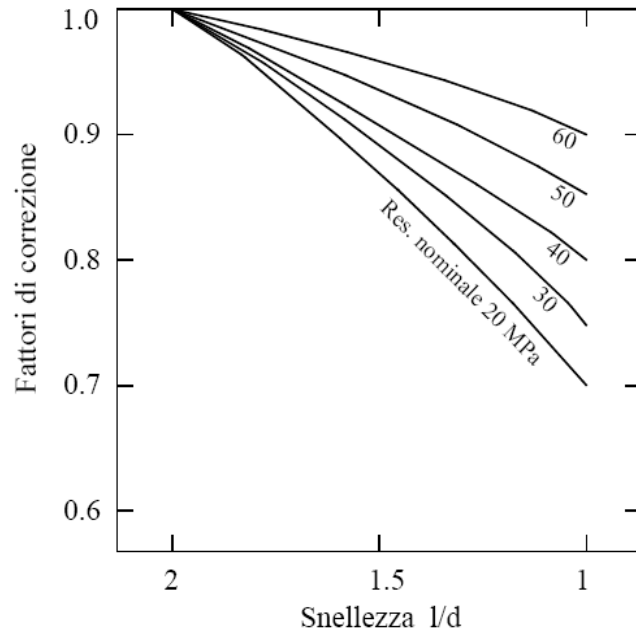
## Diametro delle carote



- ⇒ L'effetto del taglio e dell'azione torcente provoca maggiori danni su sezioni con inerti piccoli, che perdono la loro connessione lungo il contorno;
- ⇒ La sezione resistente non coincide con quella geometrica;
- ⇒ Danni molto limitati per inerti grossi che continuano a mantenere salda la connessione con il nucleo.

## Rapporto h/d

⇒ Al crescere del rapporto h/d si misurano resistenze decrescenti:



Fattori correttivi (ASTM C42)

- ⇒ La variazione della resistenza con la snellezza non è lineare;
- ⇒ L'effetto della snellezza sulla resistenza è minimo quando  $h/d=2$ , valore consigliato;
- ⇒ La UNI EN 12504 prevede l'adozione di 2 rapporti h/d preferenziali:

- ➔  $h/d=2$  se il risultato deve essere paragonato con la res. cilindrica;
- ➔  $h/d=1$  se il risultato deve essere paragonato con la res. cubica.

## Inclusione di armature

- ⇒ A volte i campioni estratti presentano inclusioni di solito per carotaggi su elementi con armature su più file, difficili da individuare con il pacometro;
- ⇒ Se non è possibile evitare bisogna tener conto di coefficienti correttivi;

$$\frac{R_{corretto}}{R_{misurato}} = \left[ 1 + 1,5 \left( \frac{d_r \cdot h}{d_c \cdot l} \right) \right]$$

$d_r$  = diametro barra;

$d_c$  = diametro carota;

$h$  = dist. asse barra – bordo carota

$l$  = lunghezza carota

## Direzione di perforazione

- ⇒ Per carotaggi ortogonali al getto si registrano riduzioni della resistenza tra il 5 e l'8% per cls di classe 25 MPa;

## Localizzazione

- ⇒ La resistenza non è uniforme lungo l'altezza dei getti, e si riduce dal basso verso l'alto;

## Umidità



- ⇒ Provini in condizione di saturazione presentano riduzioni della resistenza compresi tra il 10 e il 15% rispetto a condizioni asciutte;

# CAROTAGGIO – Microcarote

## Stima della resistenza cubica locale del cls in sito (UNI 10766)

- ⇒ Si utilizza un carotiere da 28 mm;
- ⇒ Il metodo è annoverato tra quelli non distruttivi;
- ⇒ Da ogni microcarota si estraggono almeno 3 provini  $h=d$ ;
- ⇒ La resistenza  $R_{CL}$  si ottiene dalla media di tutte le determinazioni (min 12), previa calibrazione;

## Calibrazione

- ⇒ Si preparano 5 impasti con resistenze distribuite tra 20 e 40 MPa e dimensioni degli inerti tra 16 e 25 mm;
  - ⇒ Si confezionano 10 cubi (spigolo 150 mm) per ogni impasto;
  - ⇒ Su 5 cubi si esegue la prova di compressione a 28 gg   $R_{c,med}$
  - ⇒ Sui rimanenti 5 si estraggono microcarote (min 3/cubo)   $R_{cl,med}$
- ⇒ Si calcolano i parametri **a** e **b** della retta di regressione

$$R_{c,med} = a + b * R_{cl,med}$$

Utilizzando tali coefficienti, si può stimare la res. cubica locale  $R_{CL}$

$$R_{CL} = 0.93 * a + b * R_{cl,med}$$

## Verifica delle tolleranze geometriche (UNI EN 12390/1)

- ⇒ **Planarità**  $t=\pm 0.0006d_m$
- ⇒ **Rettilinearità**  $t=0.03d_m$  (UNI 12504-1 7.3c)
- ⇒ **Perpendicolarità**  $t=\pm 0.5\text{mm}$



**EVENTUALE RETTIFICA o CAPPATURA**  
(per difetti di planarità)

## Tipi di prove

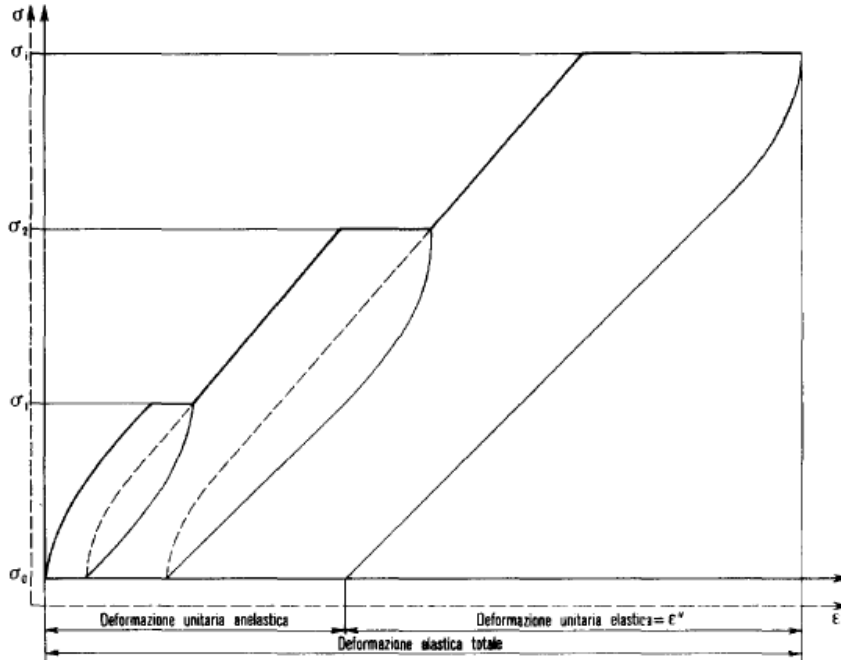
- ⇒ Compressione (EN 12390-4);
- ⇒ Modulo elastico (UNI 6556);
- ⇒ Trazione indiretta (EN 12390-6);
- ⇒ Prove chimiche (carbonatazione, cloruri, solfati)

## Modulo di elasticità secante (UNI 6556)

- ⇒ Il provino viene preliminarmente strumentato con 3 trasduttori di deformazione (strain-gauges) a 120° sulla superficie laterale
- ⇒ La prova è CICLICA.
- ⇒ Tensione di riferimento  $\sigma_R$   
Tensione di rottura preventivamente determinata su almeno 3 carote omologhe provenienti dallo stesso campionamento;
- ⇒ Viene fissata la tensione max di prova  $\sigma_3 = 1/3 \sigma_R$
- ⇒ La prova si esegue attraverso cicli di carico-scarico fino a stabilizzazione delle deformazioni, tra un valore minimo pari a  $\sigma_0 = 1/10 \sigma_3$  e le tensioni  $\sigma_1 = 1/3 \sigma_3$ ,  $\sigma_2 = 2/3 \sigma_3$ ,  $\sigma_3$ .

## Modulo di elasticità secante (UNI 6556)

⇒ Per ogni livello di tensione  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  si determina il corrispondente valore del Modulo Elastico Secante



$$E_{i/3 \text{ sec}} = \Delta\sigma_i / \Delta\varepsilon_{el,i}$$

$\Delta\sigma_i$  variazione di tensione al ciclo i-esimo

$\Delta\varepsilon_{el,i}$  variazione di deformazione elastica al ciclo i-esimo misurata allo scarico

# CAROTAGGIO – Prove di laboratorio – Modulo Elastico

## RISULTATI DELLE PROVE DI COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3)

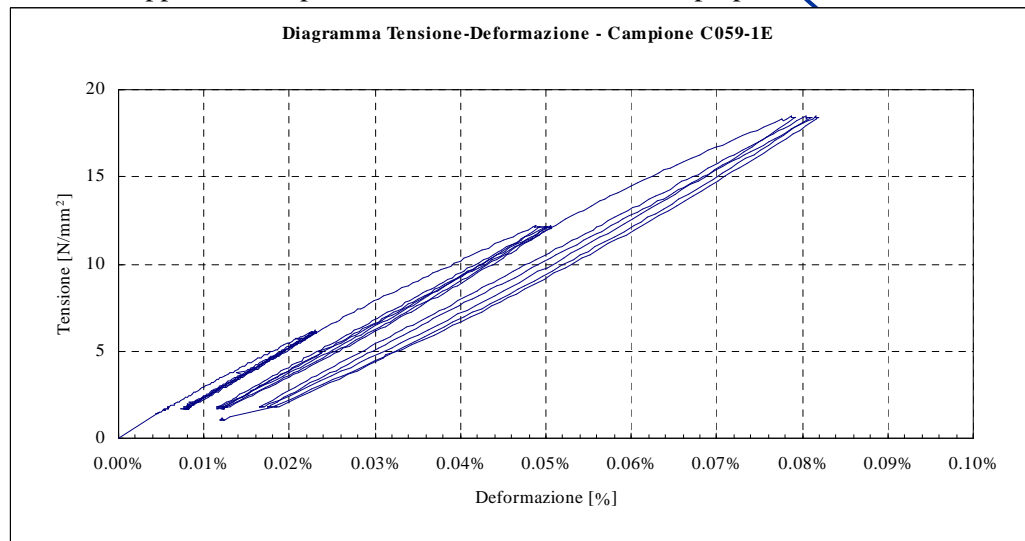
Contr.	Data Prova	Dimensioni (*)		Sez. [cm <sup>2</sup> ]	Peso specifico apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Carico unitario di rottura	
		d [cm]	h [cm]			[kg/cm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
CT-SR 059-1C	07/11/06	10.47	28.60	86.10	2426	563	56.3
CT-SR 059-2C	07/11/06	10.49	28.42	86.43	2412	516	51.6
CT-SR 059-3C	07/11/06	10.46	28.72	85.93	2423	593	59.3

Note: (\*) determinate secondo UNI EN 12390-3 App. B. I campioni verificano le tolleranze di perpendicolarità, rettilineità, planarità secondo UNI EN 12390-1 App.A

## RISULTATI DELLE PROVE PER DETERMINAZIONE DEL MODULO ELASTICO SECANTE (UNI 6556-76)

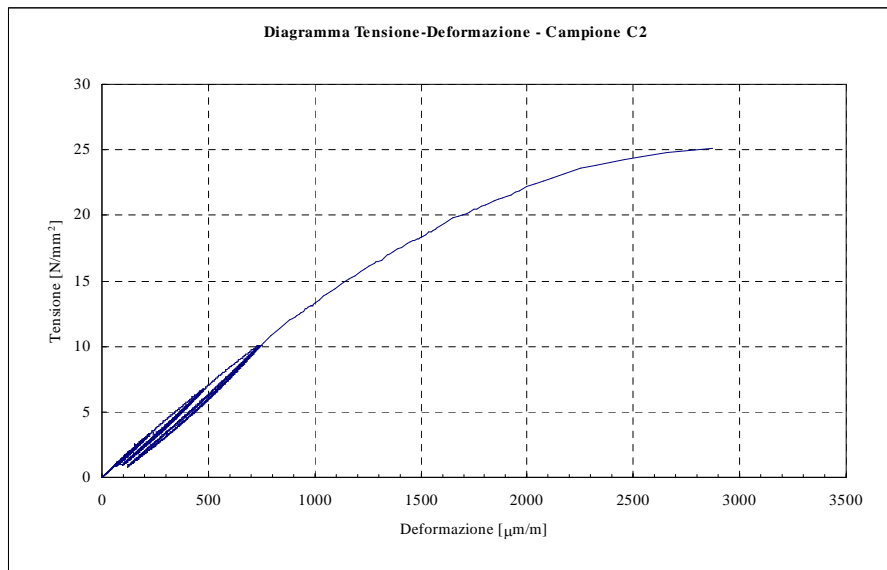
Contr.	Data Prova	Dimensioni (*)		Sez. [cm <sup>2</sup> ]	Peso specifico apparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensione di rottura misurata [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensione massima di prova $\sigma_3$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo Elastico Secante [N/mm <sup>2</sup> ]		
		d [cm]	h [cm]					E <sub>1/3sec</sub>	E <sub>2/3sec</sub>	E <sub>3/3sec</sub>
CT-SR 059-1E	13/11/06	10.51	28.97	86.76	2408	51.7	18.6	29170	27380	25040
CT-SR 059-2E	13/11/06	10.41	28.92	85.11	2441	57.1	18.6	27600	27360	26440
CT-SR 059-3E	13/11/06	10.49	28.55	86.43	2408	58.5	18.6	30430	28770	27780

Note: (\*) determinate secondo UNI EN 12390-3 App. B. I campioni verificano le tolleranze di perpendicolarità, rettilineità, planarità secondo UNI EN 12390-1 App.A.



# CAROTAGGIO – Prove di laboratorio

Provino strumentato per misura di deformazioni longitudinali e trasversali



## STIMA DELLA RESISTENZA CARATTERISTICA IN SITO

### Normativa europea DRAFT prEN13791

**N ≥ 15**

**f<sub>ck</sub>** Il minore tra ...

(valori  
caratteristici)

$$f_{ck} = f_{c,med} - 1.48 * \delta$$

dev. St.

$$f_{ck} = f_{c,min} + 4$$

**3 ≤ N ≤ 14**

**f<sub>ck</sub>** Il minore tra ...

$$f_{ck} = f_{c,med} - k$$

(diminuisce al  
crescere di N)

$$f_{ck} = f_{c,min} + 4$$

n	k
10-14	4
7-9	5
3-6	6

## STIMA DELLA RESISTENZA CUBICA

### Metodo della Concrete Society

⇒ **Dato di partenza:**  $R_{car}$  (res. cilindrica carota, fornita dal Laboratorio Ufficiale)

⇒ A partire dal valore di **snellezza delle carote**  $\lambda = h/\Phi$  si determina la

**RESISTENZA CILINDRICA**

$$R_{cil} = \frac{2}{(1.5 + \frac{1}{\lambda})} * R_{car}$$

⇒ Quindi si determina la resistenza cubica attuale (in situ)

**RESISTENZA CUBICA**

$$R_{cub} = 1.25 * R_{cil}$$

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

**Metodo:** misura della forza di estrazione di un elemento inserito nel cls.

L'inserito destinato all'estrazione può essere:

- 1) pre-inglobato nel cls;
- 2) post-inserito tramite foratura del cls indurito.

**Obiettivo:** mettere in relazione

FORZA DI ESTRAZIONE



RESISTENZA DEL CONGLOMERATO

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## Apparecchiatura di prova:

- Inserto metallico pre o post inserito;
- Estrattore (martinetto oleodinamico);
- Pompa idraulica, raccorderia;
- Anello di contrasto;
- Misuratore di forza (manometro o cella di carico) con indicatore del valore di picco.

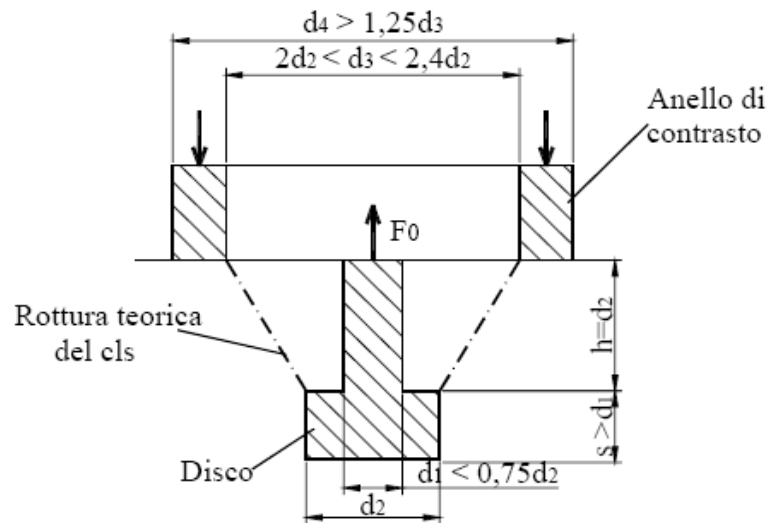
## Tipi di prova:

- Metodo con inserto pre-inserito (UNI 9536, ASTM C900);
- Metodo per foratura (UNI 12504-3, UNI 10157 norma italiana)

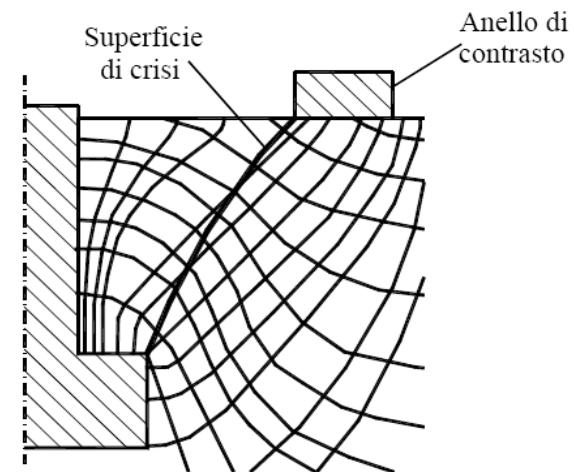
# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO CON INSERTO PRE-INSEBITO

L'inserto è formato da un disco e da uno stelo che può essere solidale col disco o avvitato



Rapporti dimensionali



Meccanismo di crisi

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO CON INSERTO PRE-INSERTITO - Esecuzione della prova

- Il carico viene incrementato gradualmente fino a produrre la rottura
- Si misura la forza di estrazione  $F_0$
- E' possibile determinare la tensione media di estrazione:

$$f_p = F_0 / A$$

$$A = \frac{\pi}{4} (d_3 + d_2) \sqrt{(d_3 - d_2)^2 + 4h^2}$$

superficie laterale del tronco di cono

La forza di estrazione media, riferita ad una zona con caratteristiche omogenee, si ottiene dall'estrazione di un

**Numero minimo di inserti = 6 (UNI 9536)**

- La distanza minima tra 2 inserti  $\geq 6d_2$
- La distanza minima tra un inserto e il bordo libero  $\geq 3d_2$

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO CON INSERTO PRE-INSERITO – LOK TEST

### Peculiarità del metodo

- E' un metodo di estrazione molto diffuso, conforme ad ASTM C900;
- E' mirato a indagare la qualità superficiale del cls, cui è legata la durabilità dell'opera;
- La profondità dell'indagine è fissata a 25 mm (evitare le armature)

### **Dimensioni degli elementi**

- Diametro dello stelo di acciaio = 11 mm;
- Diametro del disco = 25 mm, spessore 8 mm;
- Diametro interno dell'anello = 55 mm

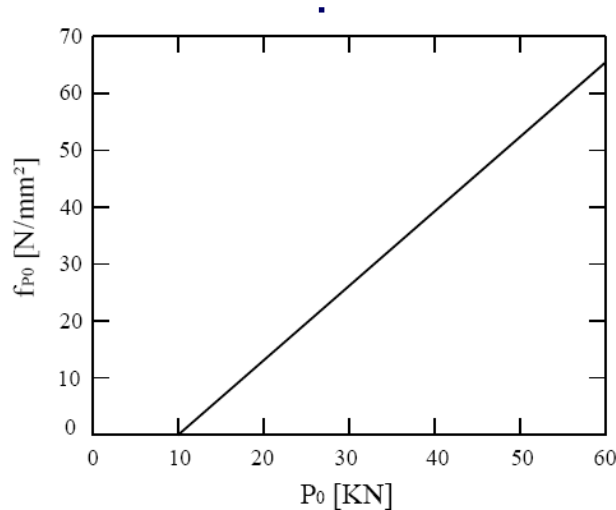
La sperimentazione condotta in Danimarca negli anni '60 ha consentito di fissare il diametro dell'anello di contrasto in 55 mm per far sì che la retta di correlazione abbia pendenza di 45°.

Esempio: Ad una forza di estrazione di **1kN** corrisponde una resistenza cilindrica di **1MPa**

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)



## METODO CON INSERTO PRE-INSERTITO - Calibrazione

La Normativa europea DRAFT prEN13791 propone una curva di correlazione tra



**Forza di estrazione  $P_0$**   
**Resistenza iniziale all'estrazione  $f_{P0}$**

Per ciascuna prova (min. 9 prove):

1. Si misurano le forze di estrazione  $P_0$  (curva di corr.)  
  $f_{P0}$  (res. iniziale estraz.)
2. Si estraggono carote sui medesimi punti e si eseguono prove di compressione (in laboratorio)  
  $f_c$  (res. cilindrica in situ)

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO CON INSERTO PRE-INSERTITO - Calibrazione

Per ciascuna prova si calcola:

$$\delta f = f_c - f_{P0}$$



$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta f_{med} & \text{(valor medio)} \\ \delta & \text{(dev. standard)} \end{array} \right.$$

Si determina



$$\Delta f = \delta f_{med} - k_1 * \delta \quad (k_1 \text{ diminuisce al crescere di } N)$$

Fattore correttivo con cui traslare la curva di correlazione iniziale

Infine, per avere la stima della resistenza cilindrica in sito:

$$f_{c,P0} = f_{P0} + \Delta f$$

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

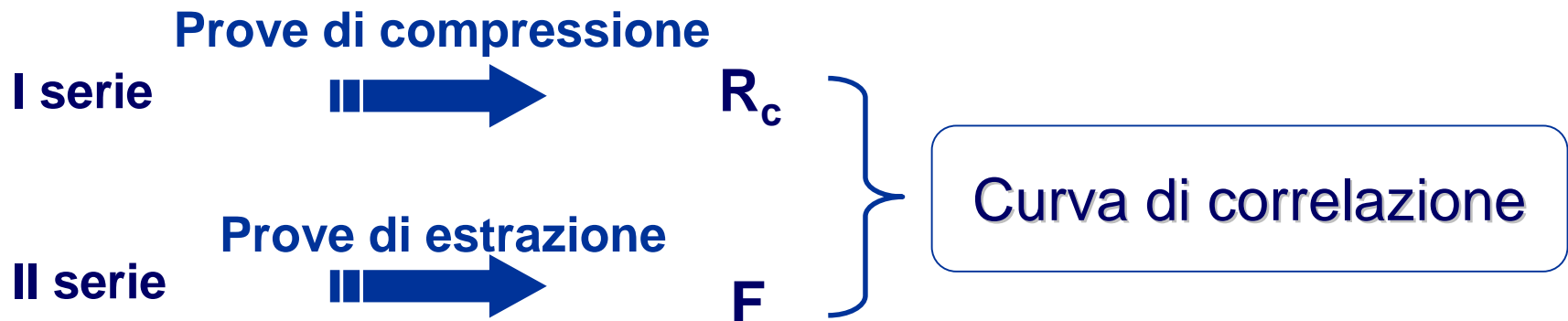
## METODO CON INSERTO PRE-INSERTITO - Calibrazione

Secondo UNI 9536

Si confezionano e si portano a maturazione **2 serie di provini cubici** (una delle quali con inserti pre-inseriti)

L'indagine viene eseguita su almeno 4 rapporti A/C

Per ciascun rapporto A/C si confezionano 4+4 provini (min.)



Note:

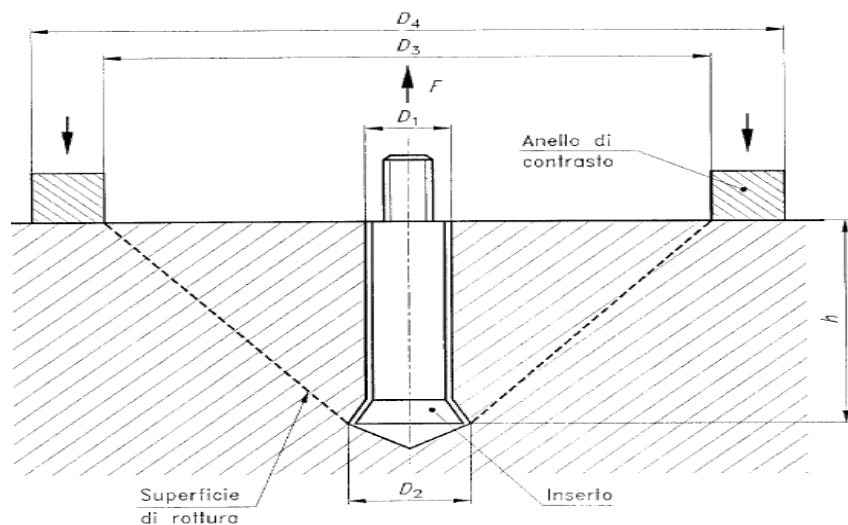
Tali prove di calibrazione forniscono coefficienti di correlazione superiori a 0,95.

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO PER FORATURA

L'inserto è costituito da un elemento metallico che può essere:

1. a espansione geometrica (caso a)

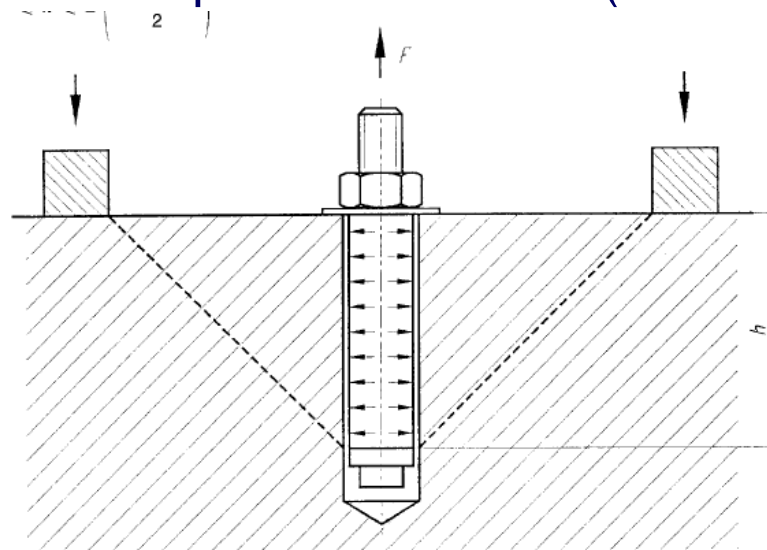


L'inserto si adatta alla cavità del foro senza provocare stati di tensione nel cls.

La profondità utile dell'inserto non deve essere minore di 35 mm.

Per cls con aggregati di diam. max  $> 32\text{mm}$  è necessario impiegare inserti più lunghi di 35 mm.

2. a espansione forzata (caso b)



L'inserto si adatta alla cavità del foro, cilindrica in tutta la lunghezza, mediante l'applicazione di una coppia di serraggio, creando un'espansione forzata uniforme su tutta la superficie cilindrica, cui corrisponde uno stato di tensione normale compresa tra 0,1 e 1 MPa.

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO PER FORATURA - Esecuzione della prova

- Esecuzione foro cilindrico del cls seguita nel caso a) da un tratto sottoquadro che consente l'espansione libera dell'inserto;
- Installazione dell'inserto e collegamento del dispositivo di carico;
- Il carico viene incrementato gradualmente fino a produrre la rottura del cls con velocità tra 0.8 e 1.2 kN/s;
- Si misura la forza di estrazione  $F$  mediante indicatore di picco.

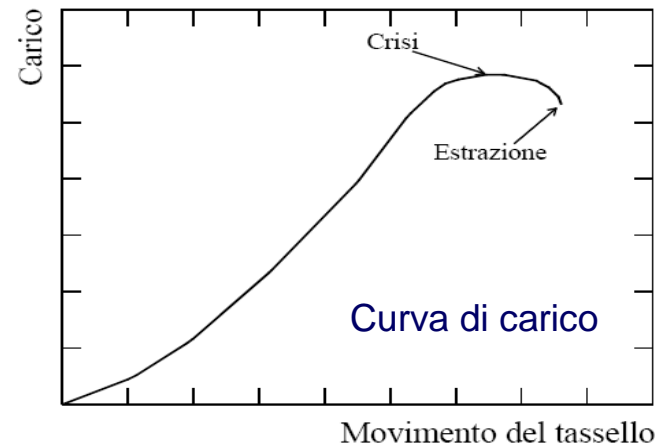
La forza di estrazione media, riferita ad una zona con caratteristiche omogenee, si ottiene dall'estrazione di un

**Numero minimo di inserti = 3 (UNI 10157)**

- La distanza minima tra 2 inserti  $\geq 5h$ ;
- La distanza minima tra un inserto e il bordo libero  $\geq 3h$ .

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO PER FORATURA - Esecuzione della prova



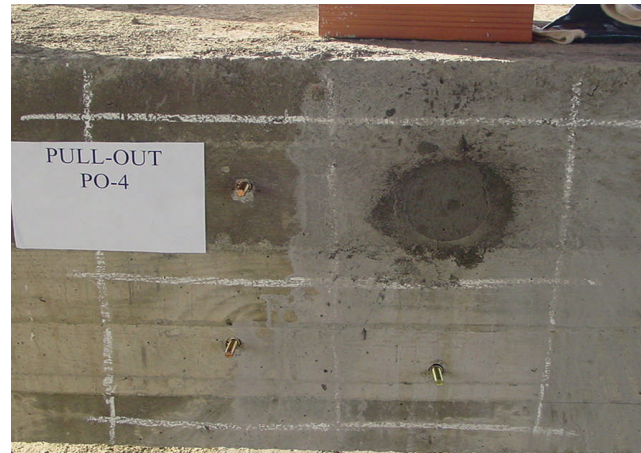
Se uno dei 3 valori della forza di estrazione si discosta più del 20% dal valor medio, tale valore deve essere scartato e sostituito dal risultato di un'ulteriore prova. Nel caso di ulteriore esito non soddisfacente il valore medio della forza di estrazione sarà da ritenersi non rappresentativo.

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO PER FORATURA - Esecuzione della prova



Attrezzatura di estrazione



Tasselli inseriti prima dell'estrazione



Fase di estrazione



Coni di estrazione

# PROVE DI ESTRAZIONE (PULL-OUT)

## METODO CON INSERTO POST-INSERITO - Calibrazione

### Secondo UNI 10157

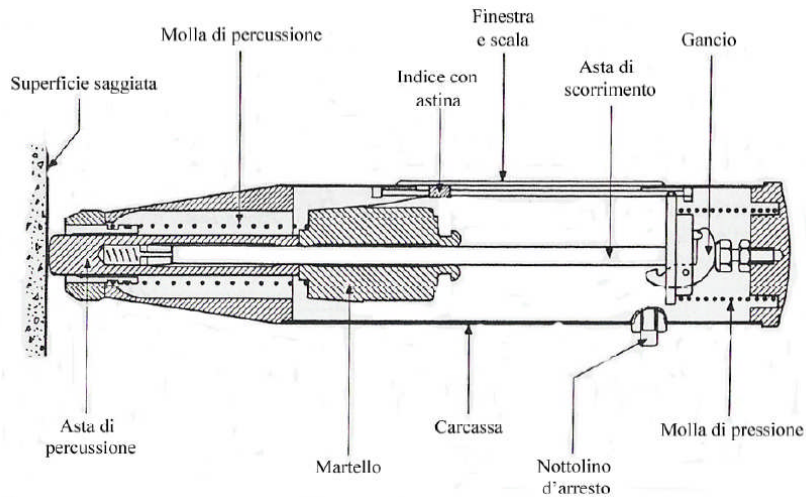
- ❑ Secondo la **UNI 10157** occorre confezionare e portare a maturazione con le stesse modalità delle serie di provini cubici e di blocchi di fissate dimensioni, di spessore 200 mm per inserti fino a profondità utile di 40 mm.
- ❑ Per ogni tipo di composizione (almeno 4), ottenuta facendo variare il rapporto A/C stabilito, si eseguono contemporaneamente sia le prove di compressione sui provini cubici che quelle di estrazione.
- ❑ La curva di taratura è determinata sulla base di una elaborazione statistica dei risultati ed è **utilizzabile solo entro la gamma di resistenze del cls saggiata**.

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

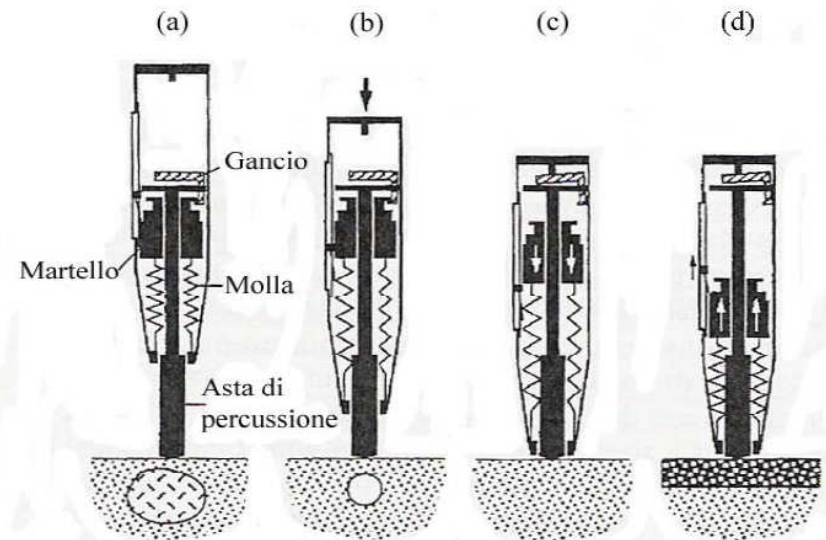
## PRINCIPIO DEL METODO

UNI 9189; EN 12504-2

Una massa scagliata da una molla colpisce un pistone a contatto con la superficie di prova e il risultato della prova viene espresso in termini di distanza di rimbalzo della massa.



Sezione dello strumento



Schema di esecuzione della prova

Mediante delle curve, in dotazione allo strumento o diversamente ottenute, l'**Indice sclerometrico**, proporzionale all'altezza di rimbalzo, viene correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Limiti di utilizzo

Lo sclerometro può essere correttamente impiegato per:

1. valutare la omogeneità del calcestruzzo in situ;
2. delimitare zone di cls degradato;
3. stimare le variazioni nel tempo delle proprietà del cls;
4. ottenere informazioni approssimative sulla resistenza.

ma non può sostituire i metodi distruttivi nella determinazione della resistenza;

Tale determinazione può essere effettuata solo in presenza di una curva sperimentale di taratura.

## Motivi

- La determinazione dell'indice di rimbalzo è influenzata da molti fattori;
- Non è possibile legare una misura di durezza superficiale a una resistenza.

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Fattori che influenzano i risultati

- Tipo di cemento;
- Tipo di inerti;
- Finitura superficiale;
- Dosaggio;
- Massa e spessore dell'elemento;
- Umidità (riduzioni fino al 20% dell'indice per superficie bagnata);
- Indurimento superficiale per carbonatazione;
- Altri

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Durezza superficiale e resistenza

I calcestruzzi poco rigidi e resistenti assorbono più energia nell'urto, rispetto a calcestruzzi più rigidi e resistenti, fornendo un valore più basso dell'indice di rimbalzo.

Poiché è possibile per due calcestruzzi con diversa composizione avere la stessa resistenza ma rigidezza diversa, si possono ottenere due differenti indici di rimbalzo anche a parità di resistenza.

Ma è anche possibile che due calcestruzzi con diversa resistenza abbiano lo stesso indice di rimbalzo, se la rigidezza del meno resistente è maggiore di quella del più resistente.

## **In conclusione**

L'indice sclerometrico è sì correlato alla resistenza del cls ma anche agli altri fattori elencati, pertanto

Una correlazione tra le 2 grandezze è possibile previa calibrazione dello strumento **su provini dello stesso cls di quello da testare.**

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## ESECUZIONE DELLA PROVA

### Preparazione

- ☐ L'area di prova deve essere di circa 30x30cm.
- ☐ Le superfici devono essere preventivamente levigate con pietra abrasiva.
- ☐ Per ogni area si determina una griglia su cui si eseguono almeno 9 misure, distanti tra loro almeno 25 mm e non meno di 25 mm dal bordo.
- ☐ L'indice di rimbalzo viene quindi determinato come media delle 9 misure eseguite.
- ☐ Preliminarmente deve essere eseguito un controllo di riferimento dello strumento mediante impiego di incudine di taratura.

**Se oltre il 20% di tutte le misure si discosta dalla media per più di 6 unità l'intera serie di misure deve essere scartata.**

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## ESECUZIONE DELLA PROVA

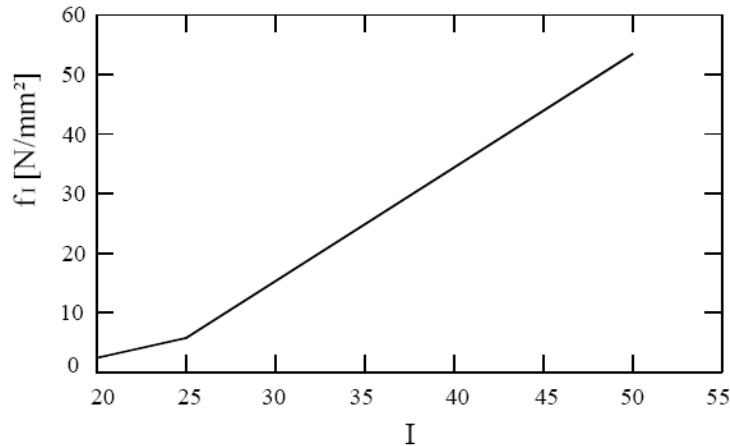
### Metodo utilizzato presso Laboratorio Uff. Prove Materiali – Univ. CT

- ☐ Vengono eseguite 12 battute per ciascuna area.
- ☐ Vengono quindi scartate le 2 misure estreme.
- ☐ Ordinando i dieci valori rimanenti in senso crescente vengono inizialmente scartati i valori che presentano uno scarto maggiore di 5 divisioni dal valore minimo.
- ☐ Sui valori rimanenti, in numero non minore di 5, viene calcolato un valore medio provvisorio che viene quindi confrontato con i risultati non considerati.
- ☐ Quelli tra questi che mostrano uno scarto minore di 5 divisioni rispetto alla media provvisoria vengono utilizzati, insieme a quelli già considerati prima, per il calcolo della media definitiva.

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Calibrazione

La Normativa europea DRAFT prEN13791 propone una curva di correlazione tra



- **Indice sclerometrico I**
- **Resistenza iniziale al rimbalzo  $f_i$**

Per ciascuna prova (min. 9 prove):

1. Si misura l'indice sclerometrico I

(curva di corr.)



**$f_i$**

(res. iniziale)

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

(in laboratorio)



**$f_c$**

(res. cilindrica in situ)

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Calibrazione

Per ciascuna prova si calcola:

$$\delta f = f_c - f_l$$



$$\left\{ \begin{array}{ll} \delta f_{\text{med}} & (\text{valor medio}) \\ \delta & (\text{dev. standard}) \end{array} \right.$$

Si determina



$$\Delta f = \delta f_{\text{med}} - k_1 * \delta \quad (k_1 \text{ diminuisce al crescere di } N)$$

Fattore correttivo con cui traslare la curva di correlazione iniziale

Infine, per avere la stima della resistenza cilindrica in sito:

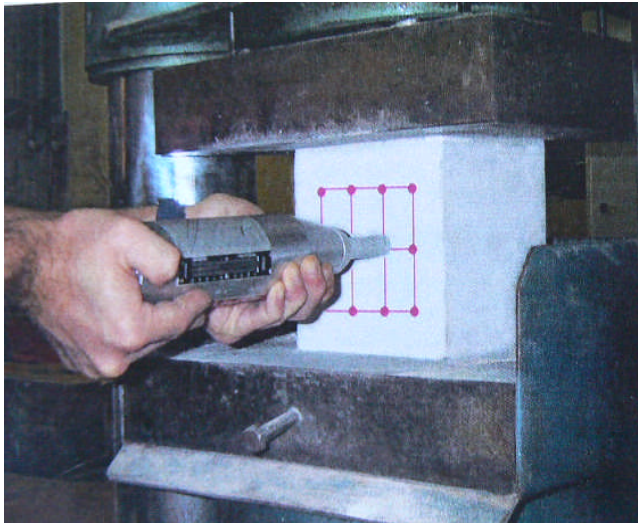
$$f_{c,l} = f_l + \Delta f$$

# PROVE DI DUREZZA SUPERFICIALE (SCLEROMETRO)

## Calibrazione (secondo UNI 9189)

Si confezionano e si portano a maturazione almeno **10 provini cubici**

L'indagine viene eseguita su almeno 3 rapporti A/C (min 30 provini);



**Prove sclerometriche I**

**I fase**



**Prove di compressione  $R_c$**

**II fase**



**Curva di correlazione**

# 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;
- ⇒ Le disomogeneità presenti nei getti (fessure, cavità, etc) possono essere indagate analizzando le variazioni di velocità e gli assorbimenti parziali dell'onda di vibrazione dovuti a riflessioni, rifrazioni e attenuazioni dell'onda secondo determinate direzioni;

# 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.

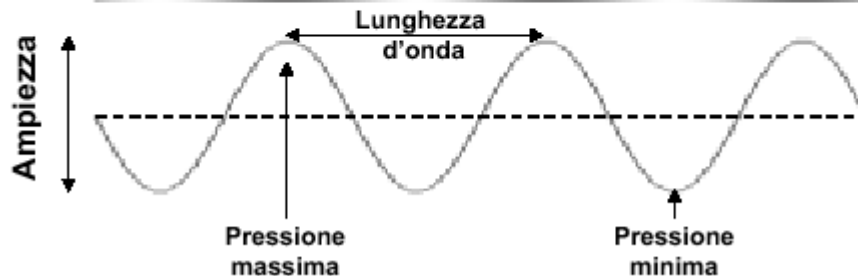
$$\text{velocità} = V = \lambda * f$$

Diagram showing the relationship between velocity (V), wavelength (λ), and frequency (f). Arrows point from the variables to their respective labels: λ to "lunghezza d'onda" and f to "frequenza".

lunghezza d'onda

frequenza

Propagazione



Rappresentazione di un'onda sonora

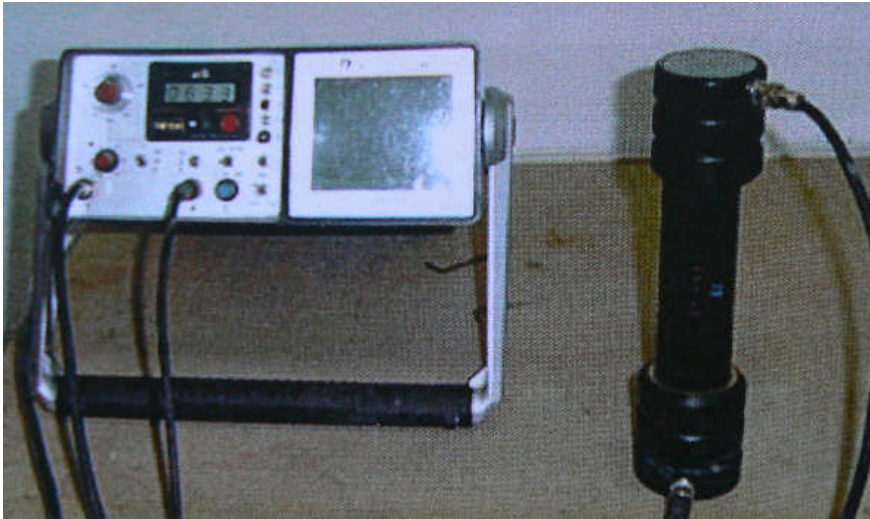
Principio del metodo:

Mezzo: elastico, omogeneo, isotropo

Onde: longitudinali

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

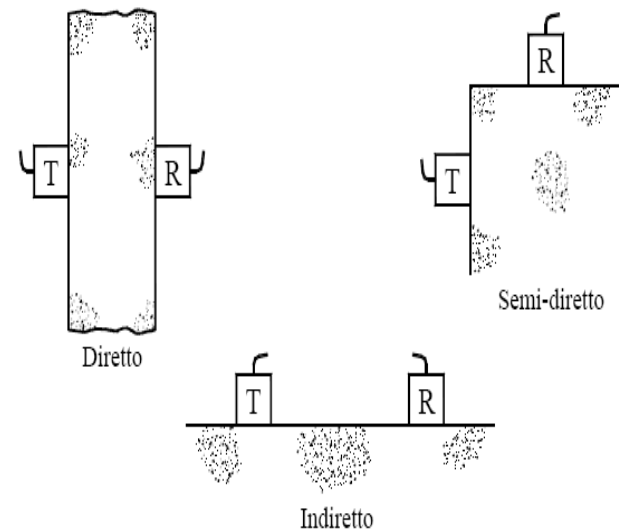
# PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)



Rilevatore ad ultrasuoni

## Operazioni preliminari di prova

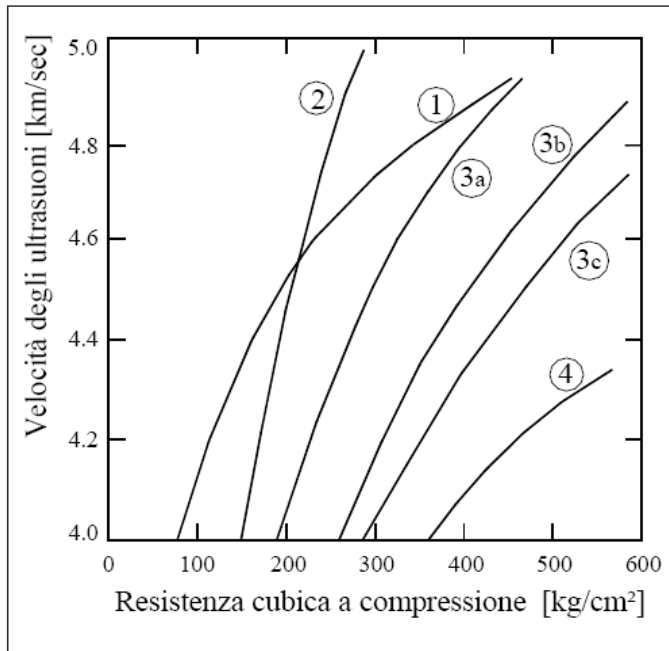
- Taratura dei tempi a mezzo blocco di calibrazione;
- Individuazione delle armature;
- Lisciatura delle superfici;
- Impostazione fondo scala e ritmo di ripetizione;
- Tracciamento dei punti di misura;
- Accoppiamento interfaccia sonde-cl con gel o grasso.



Tecniche di rilievo

# PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

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



curva 1:

$$R_c = 0,1125 \cdot e^{1,6619 \cdot V}$$

curva 2:

$$R_c = 24,34 \cdot V^2 - 71,95 \cdot V + 42,73$$

curva 3a:  $R_c = V^{4,1}$

curva 3b:  $R_c = V^{4,0}$

curva 3c:  $R_c = V^{3,8}$

curva 4:

$$R_c = 68,334 \cdot 10^{-3} \cdot V^{6,184}$$

Correlazioni analitiche V- $R_c$  vari autori

# PROVE ULTRASONICHE (UNI 9524; EN 12504/4)

Il cls non è tuttavia 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:

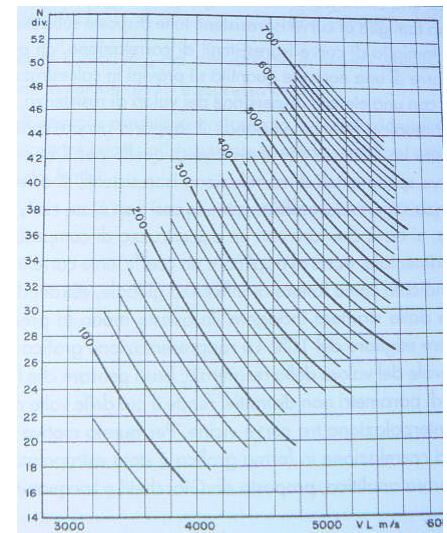
1. **Dimensione e natura degli inerti**: la presenza di inerti di grande dimensione fa aumentare la velocità anche se la resistenza resta costante;
2. **Rapporto A/C**: poco influente sulla velocità e molto sulla resistenza;
3. **Contenuto di umidità**: al crescere dell'umidità la velocità aumenta fino 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.**

# 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 ind. (V e I) la correlazione che si ottiene con la variabile dip. ( $R_c$ ) da origine a una distribuzione di punti intorno a una "superficie di interpolazione";
- ⇒ Le curve di correlazione isoresistenti sono del tipo  $R_c = a \cdot V^b \cdot I^c$ .



# 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;

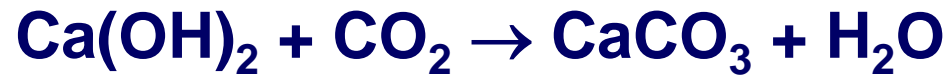
# ALTRI METODI NON DISTRUTTIVI

## 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



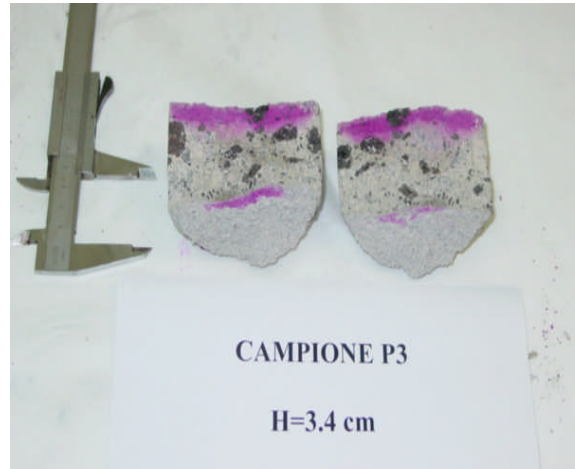
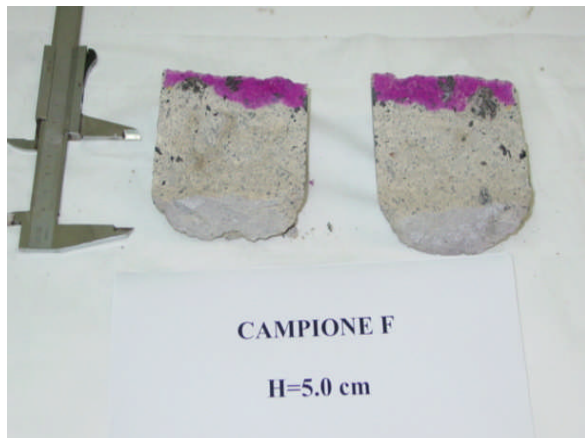
pH  
**12.5÷13.5**  **9**

- ⇒ 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)

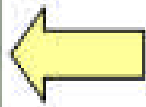
- ⇒ Su una metà di ciascun provino generalmente già sottoposto alla prova di trazione indiretta, si determina la profondità di carbonatazione.
- ⇒ Reagente: **soluzione di fenolftaleina 1% in alcol etilico**



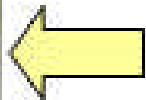
- ⇒ Il reagente, al contatto con materiale il cui pH sia maggiore di 9.2, vira al rosso e rimane incolore per valori di pH minori.

# PROVE CHIMICHE - Carbonatazione

## Prova di carbonatazione con andamento anomalo della coloritura



Lato interno



Lato esterno

- ⇒ 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.

## Analisi chimica: diffrattometrica dei raggi X

- ⇒ La quantità di ione solfato  $\text{SO}_3$  “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  $\text{CaSO}_4$ ;
- ⇒ 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 ( $\text{CaCl}_2$  usato in passato come accelerante di presa);
- ⇒ Il fenomeno si manifesta con fessurazione in corrispondenza delle armature e distacco del copriferro;

## 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 <b>CHIARA</b> (rosa)		<b>ZONA PENETRATA;</b>
Colorazione <b>SCURA</b>		<b>ZONA NON PENETRATA;</b>

# 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 resistenti;**
- ⇒ 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 <sup>2</sup> ]	Tensione di rottura [kg/mm <sup>2</sup> ]	All <sub>10</sub> spec. a rottura [%]
<b>Aq42</b>	≥23	42÷50	≥20
<b>Aq50</b>	≥27	50÷60	≥16
<b>Aq60</b>	≥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.

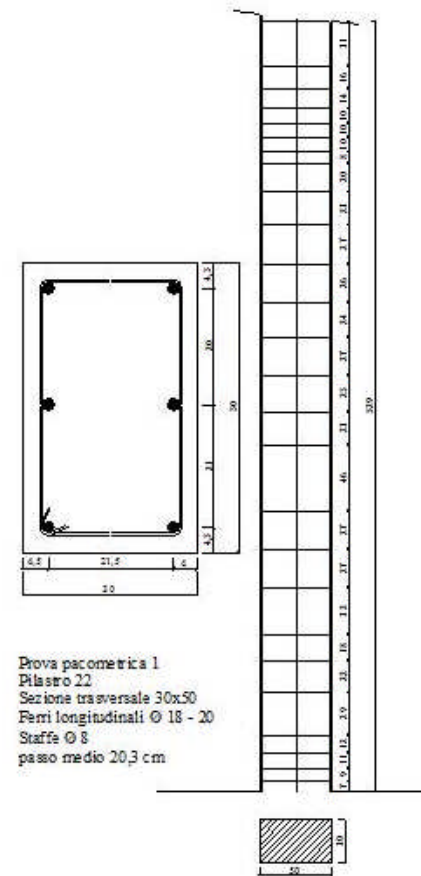
- ⇒ Gli strumenti in commercio consentono la **localizzazione molto accurata** della posizione barre e del copriferro;
- ⇒ L'incertezza sulla determinazione del diametro è di circa 2 diametri;
- ⇒ Solitamente si procede alla determinazione a mezzo **saggio diretto dei diametri in alcune sezioni** significative;
- ⇒ 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



Rilievo



Restituzione

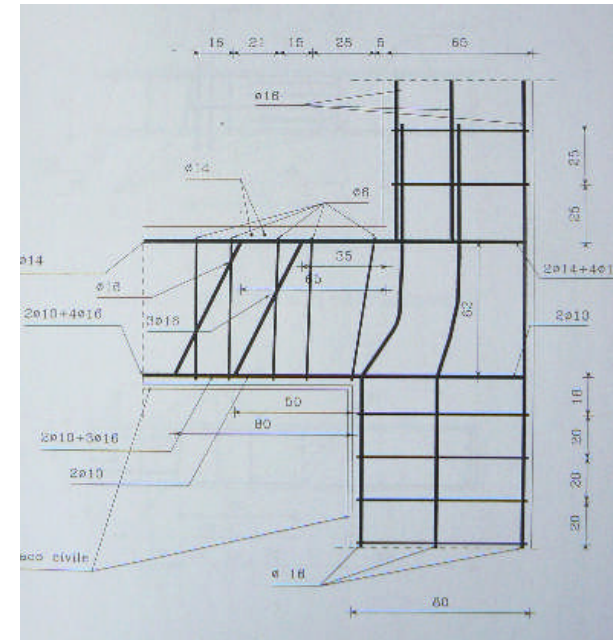
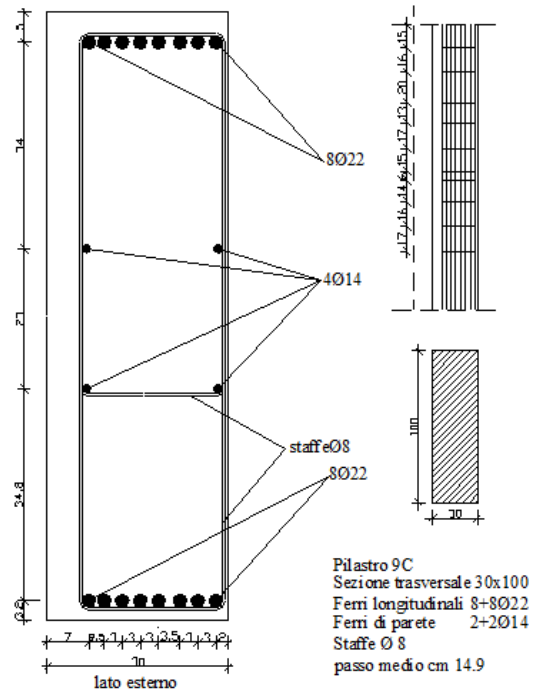
# PROVE SU ACCIAI – Rilievo diretto delle armature



pilastro



nodo trave-pilastro



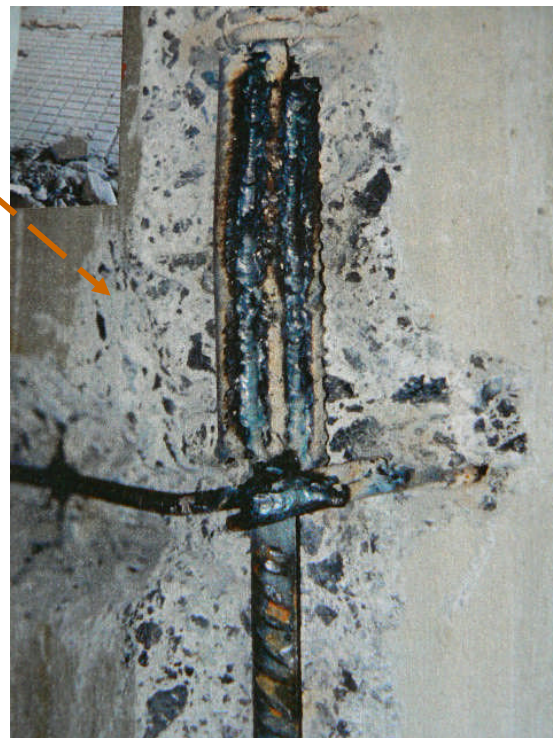
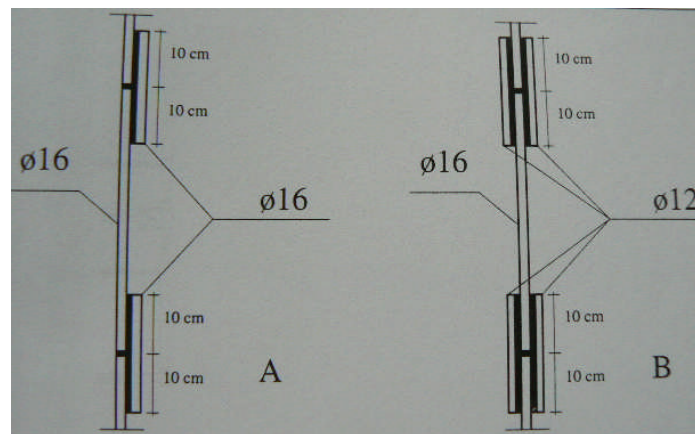
# PROVE SU ACCIAI – Prelievo e rilievo delle armature



Rilievo dei raggi di curvatura

# PROVE SU ACCIAI – Prelievo di barre

## Prelievo di armature longitudinali e trasversali e ripristino



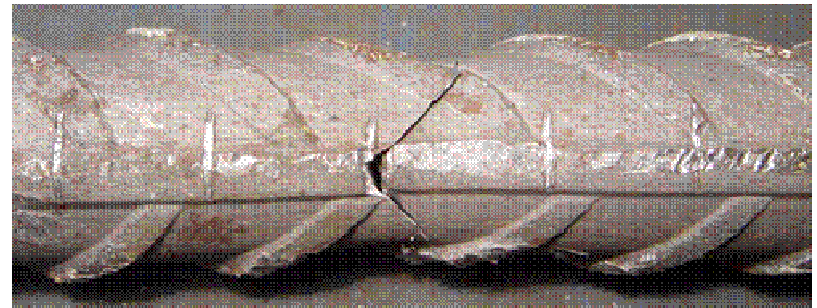
# PROVE SU ACCIAI - Trazione

## Rotture di tipo fragile

**P10**



**P6**



**P2**

Contrassegno	Data prova	$\Phi$ eff.	RESISTENZA A TRAZIONE		All. Rott. $A_5$
			Tensione di snervamento	Tensione di rottura	
		[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
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



<u>Contr.</u>	DATA	<u>D eff</u>	RESIST. A TRAZIONE		<u>All. rott.</u>
	PROVA		Tensione di snerv. <u>fy</u>	Tensione di rott. <u>ft</u>	[A 5%]
		[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

Un esempio di indagine

# 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.

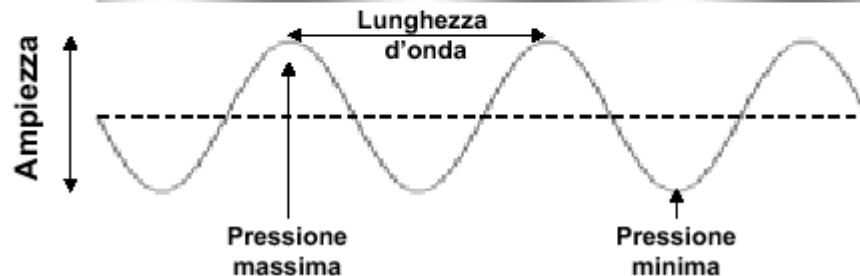
$$\text{velocità} = V = \lambda * f$$

Diagram illustrating the wave velocity formula. An arrow points from  $\lambda$  to "lunghezza d'onda" and another arrow points from  $f$  to "frequenza".

lunghezza d'onda

frequenza

Propagazione



Rappresentazione di un'onda sonora

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

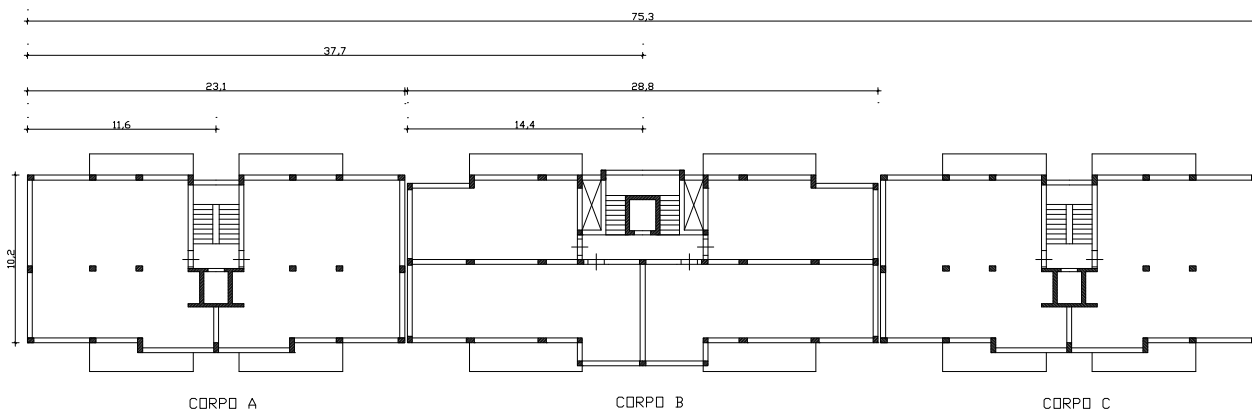


Edificio 1

Edificio 2



- ☐ 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 m<sup>2</sup>/impalcato.
- ☐ Sup. corpo centrale B: 305 m<sup>2</sup>/impalcato .
- ☐ Sup. complessiva: 800 m<sup>2</sup>/impalcato.
- ☐ N° appartamenti/imp.: 8 per edificio.



Schema planimetrico degli edifici

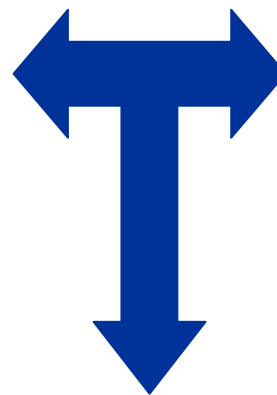
# FASE DI TARATURA – programma di indagine

## in situ

- ❑ Rilievo della velocità di propagazione  $V_{\text{situ}}$  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  $V_{\text{car}}$  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  $\sigma-\varepsilon$ .



**RICERCA DI  
CORRELAZIONI tra  $V_{\text{situ}}$  e**

- ❑ Densità  $\rho$
- ❑ 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



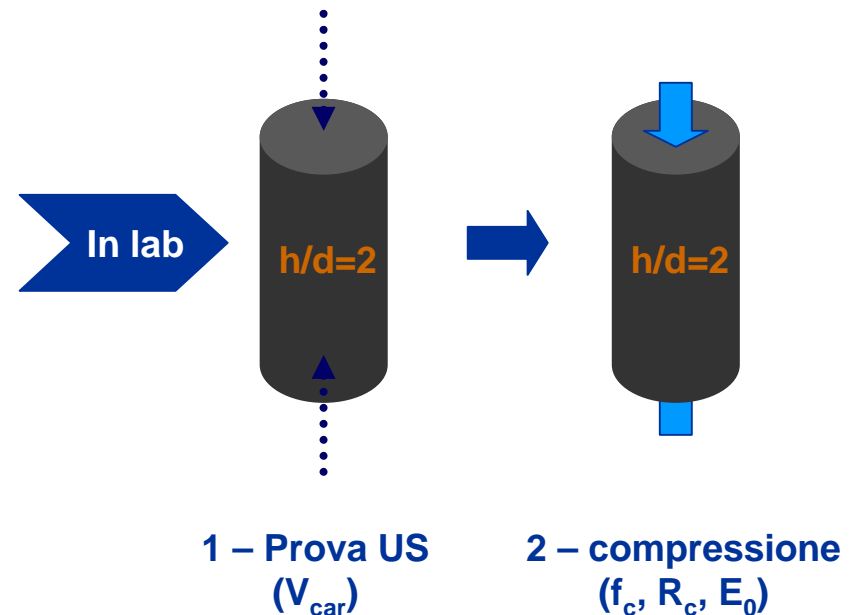
## Prove ultrasoniche in situ

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

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



Fasi di estrazione di un campione



# FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio

## RISULTATI - confronto velocità

Elemento	Carotaggio	Elevaz. f.t.	$V_{\text{situ}}$ [m/s]	$V_{\text{car}}$ [m/s]	$V_{\text{car}}/V_{\text{situ}}$
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

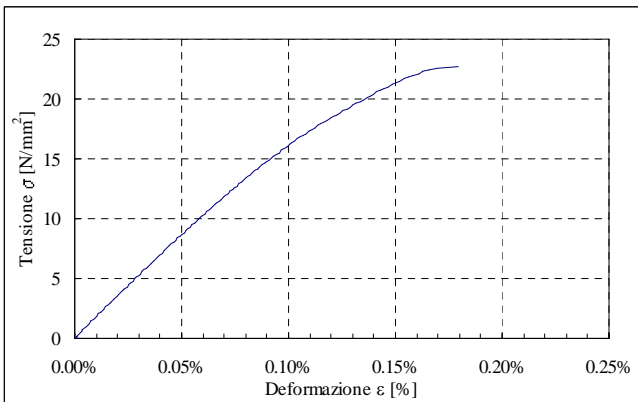


Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$



$f_c$

$E_0$

$$R_c = 2.5 \cdot f_c / (1.5 + \Phi/h)$$

(BS1881)

Car.	$\Phi$ [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Res. Cil. $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Res. cub. $R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mod. elast. $E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C1	104	2038	22,7	28,1	17850
C2	104	2035	22,4	28,0	16550
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	16550
C17	79	2008	20,1	24,7	12450
C18	104	2050	20,6	24,3	17000

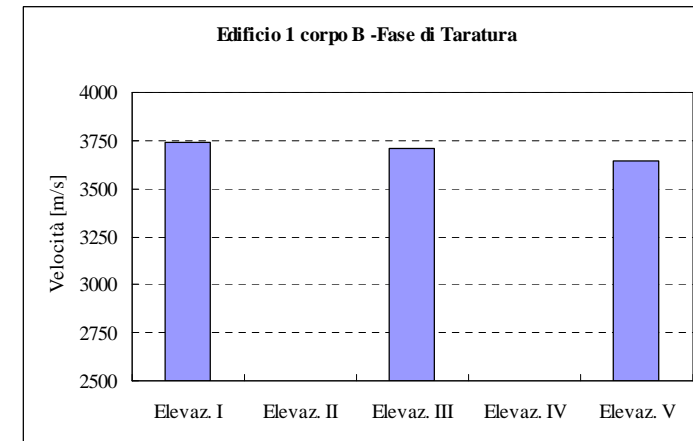
# FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio

## 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.
$V_{\text{situ}}$ [m/s]	3744	0.11	3707	0.05	3644	0.05	3698	0.04
$V_{\text{car}}$ [m/s]	3644	0.01	3622	0.03	3577	0.04	3614	0.03
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2000	0.00	2014	0.02	2025	0.01	2013	0.01
$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	22.1	0.05	21.1	0.12	19.5	0.08	20.9	0.09
$R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	27.3	0.05	25.9	0.10	23.7	0.06	25.6	0.09
$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16430	0.07	15880	0.09	15330	0.16	15880	0.10

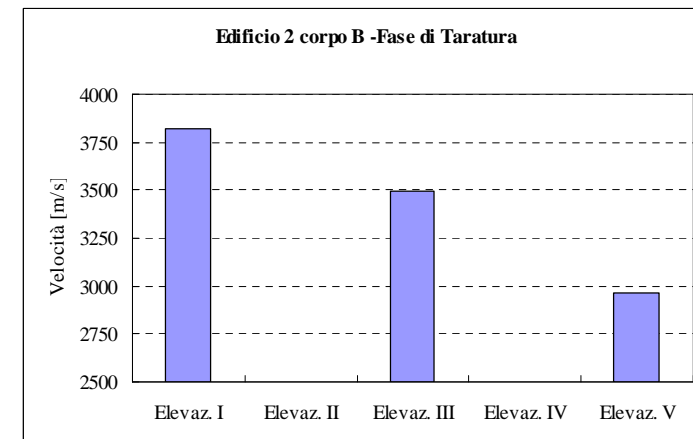
### Velocità media $V_{\text{situ}}$



### 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.
$V_{\text{situ}}$ [m/s]	3820	0.03	3491	0.02	2965	0.02	3425	0.11
$V_{\text{car}}$ [m/s]	3747	0.05	3281	0.02	2873	0.05	3300	0.12
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2024	0.01	2006	0.00	1907	0.01	1979	0.03
$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	22.2	0.03	18.3	0.05	13.1	0.08	17.9	0.23
$R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	27.6	0.03	22.5	0.05	16.1	0.08	22.1	0.23
$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	16670	0.07	12280	0.06	9300	0.16	12750	0.26

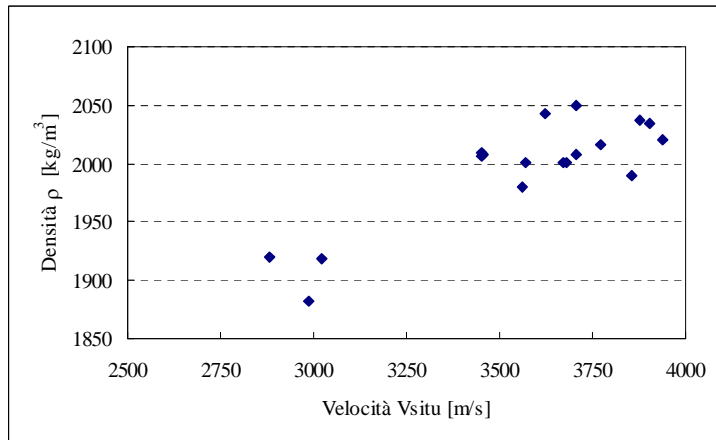
### Velocità media $V_{\text{situ}}$



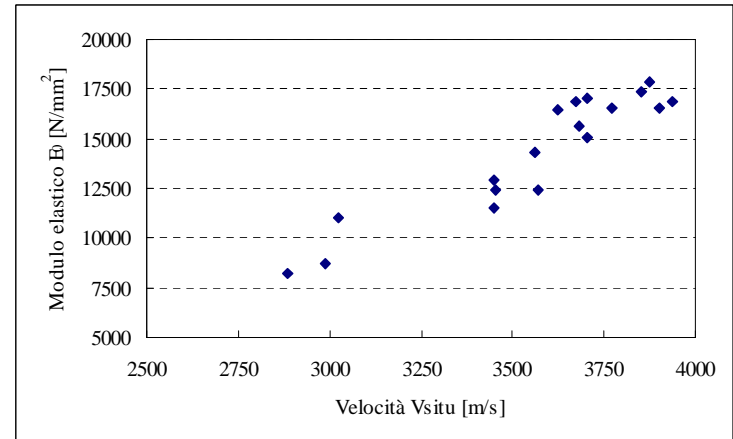
# FASE DI TARATURA – correlazioni

## DIAGRAMMI DI DISPERSIONE

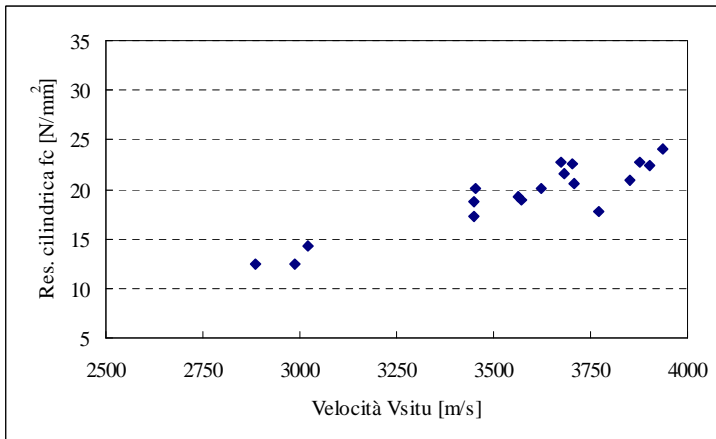
### Velocità - Densità



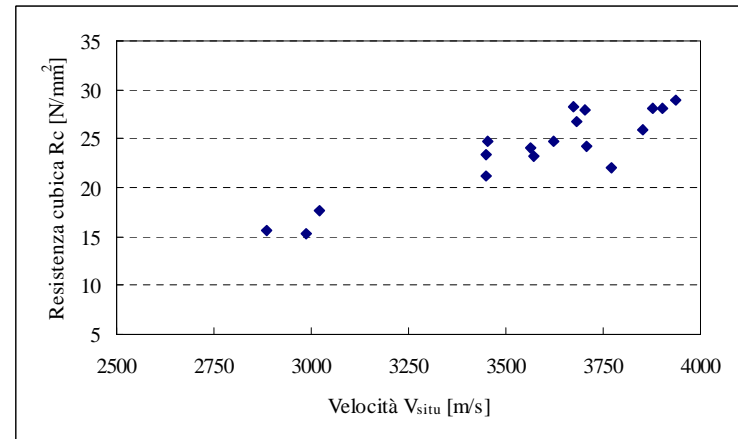
### Velocità – Modulo elastico



### Velocità – Res. cilindrica



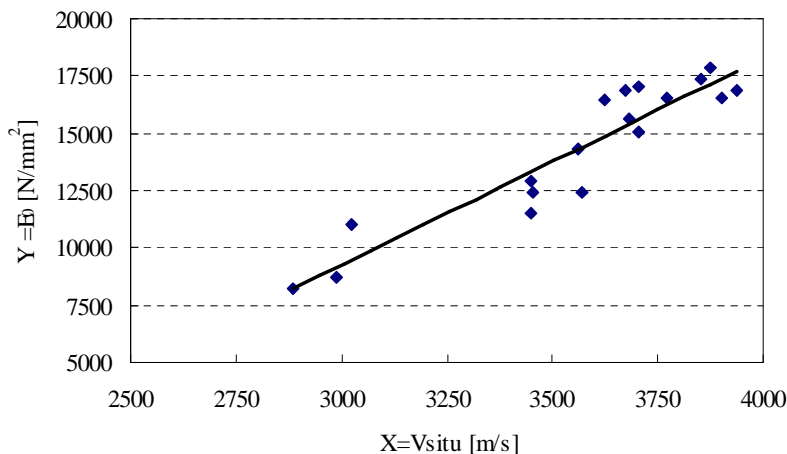
### Velocità – Res. cubica



# 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:  $\rho$ ,  $f_c$ ,  $R_c$ ,  $E_0$



$$Y = a * X + b$$

- ❑  $V_{\text{situ}}$  [m/s]- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]
- ❑  $V_{\text{situ}}$  [m/s]- $f_c$  [N/mm<sup>2</sup>]
- ❑  $V_{\text{situ}}$  [m/s]-  $R_c$  [N/mm<sup>2</sup>]
- ❑  $V_{\text{situ}}$  [m/s]-  $E_0$  [N/mm<sup>2</sup>]

Coeff. di determinazione

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

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

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



$$\hat{s}_{Y,X} = s_{Y,X} * \sqrt{N / (N - 2)}$$

errore standard della stima corretto

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

$$Y^{(1s)}_{1,2} = a * X + b \pm s^{\wedge}_{YX}$$



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

$$Y^{(2s)}_{1,2} = a * X + b \pm 2s^{\wedge}_{YX}$$



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

$$Y^{(3s)}_{1,2} = a * X + b \pm 3s^{\wedge}_{YX}$$



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

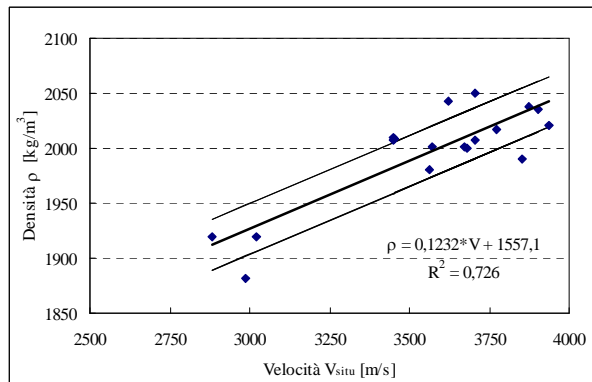
# FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio

## CORRELAZIONI - riepilogo

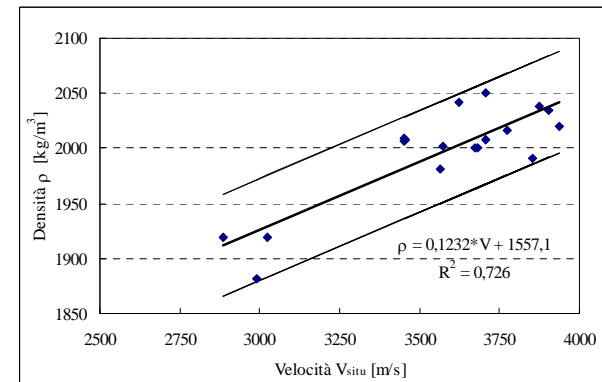
$$Y = a \cdot X + b$$

Grandezza	a	b	s	$\hat{s}$	$R^2$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	0.1232	1557.1	23.077 [kg/m <sup>3</sup> ]	24,477 [kg/m <sup>3</sup> ]	0.7260
$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.0101	-16.637	1.318 [N/mm <sup>2</sup> ]	1,398 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.8411
$R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0.0123	-19.946	1.674 [N/mm <sup>2</sup> ]	1,776 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.8338
E [N/mm <sup>2</sup> ]	9.0142	-17790	1072.447 [N/mm <sup>2</sup> ]	1137,502 [N/mm <sup>2</sup> ]	0.8718

### Velocità - Densità



$\rho_{stim} \pm 1s$

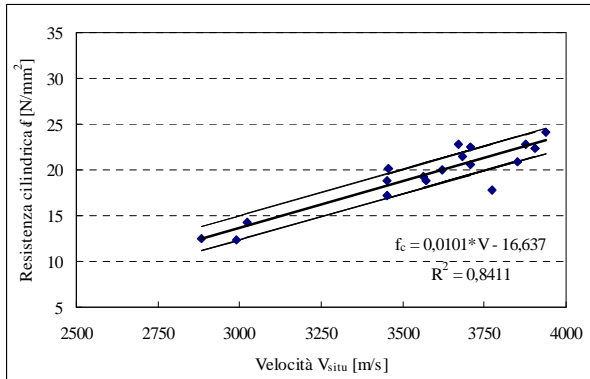


$\rho_{stim} \pm 2s$

# FASE DI TARATURA – prove in situ e di laboratorio

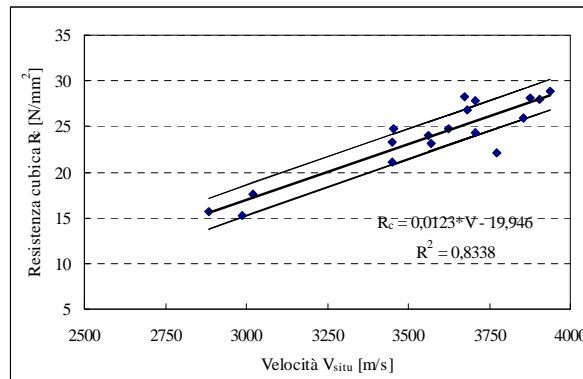
## CORRELAZIONI - riepilogo

### Velocità – Resistenza cilindrica



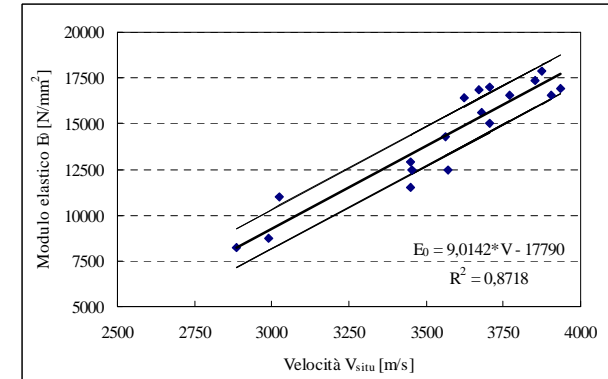
$f_{c,\text{stim}} \pm 1s$

### Velocità – Resistenza cubica

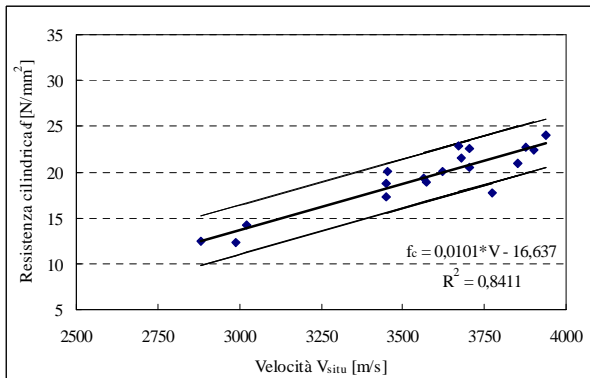


$R_{c,\text{stim}} \pm 1s$

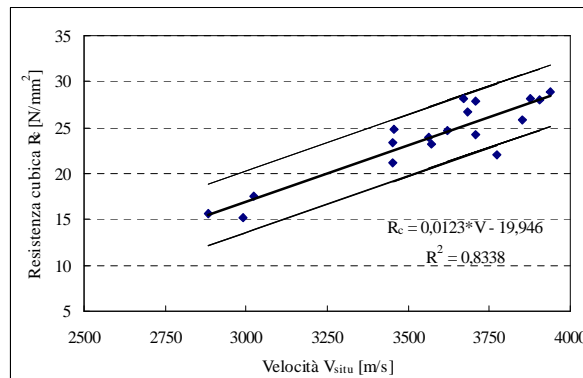
### Velocità – Modulo elastico



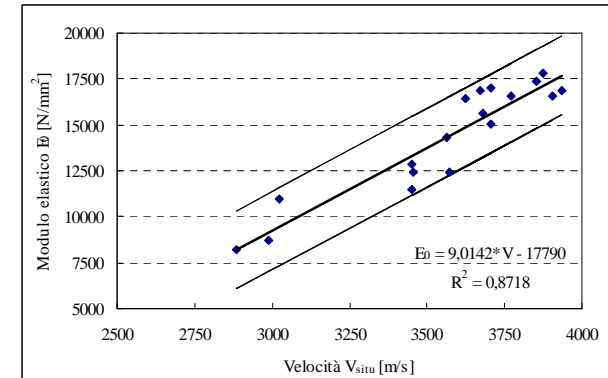
$E_{0,\text{stim}} \pm 1s$



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



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



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

## 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.

[illegible]

# FASE DI ESTENSIONE – prove in situ

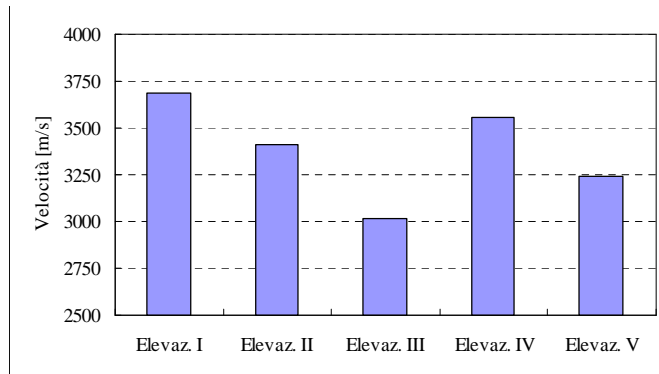
## Raccolta dei dati

### Palazzina 1 - corpo A Elevazioni I-IV – Data misure: 14/09/06

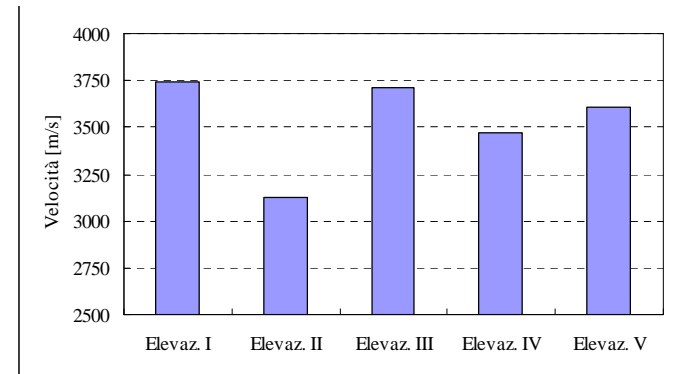
Identificazione prova						Ubicazione			Misure		Velocità V		
Elemento	Identif. elemento	Corpo scala	Elevaz. fuori terra	Direz. prova	Punto prova	dist. long.	dist. trasv.	quota	Spess. s	Tempo T	Prova singola	Media elemento	Media piano
						l [cm]	t [cm]	h [cm]	[cm]	[μs]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
Pilastro 40x40	P1	App. A	I	Trasv.	Punto 1	13	-----	88	39.8	105.6	3769	3739	3685
Pilastro 40x40	P1	App. A	I	Trasv.	Punto 2	13	-----	167	39.5	106.5	3709		
Pilastro 40x40	P2	App. A	I	Long.	Punto 1	-----	13	83	40.5	120.5	3361	3504	
Pilastro 40x40	P2	App. A	I	Long.	Punto 2	-----	13	147	40.2	110.2	3648		
Pilastro 40x40	P3	App. A	I	Trasv.	Punto 1	14	-----	83	39.5	102.7	3846	3813	
Pilastro 40x40	P3	App. A	I	Trasv.	Punto 2	16	-----	148	39.5	104.5	3780		
Pilastro 40x30	P4	App. A	II	Long.	Punto 1	-----	13	87	39.8	114.4	3479	3479	3408
Pilastro 40x30	P4	App. A	II	Long.	Punto 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----		
Pilastro 40x30	P5	App. A	II	Long.	Punto 1	-----	13	70	39.1	114.1	3427	3427	
Pilastro 40x30	P5	App. A	II	Long.	Punto 2	-----	-----	-----	-----	-----	-----		
Pilastro 40x30	P6	App. A	II	Long.	Punto 1	-----	10	69	39.1	114.8	3406	3362	
Pilastro 40x30	P6	App. A	II	Long.	Punto 2	-----	13	147	38.6	116.3	3319		
Pilastro 40x30	P7	App. A	III	Trasv.	Punto 1	12	-----	70	29.8	99.5	2995	2973	3020
Pilastro 40x30	P7	App. A	III	Trasv.	Punto 2	12	-----	147	29.8	101.0	2950		
Pilastro 40x30	P8	App. A	III	Long.	Punto 1	-----	12	60	39.3	126.2	3114	3102	
Pilastro 40x30	P8	App. A	III	Long.	Punto 2	-----	14	150	39.2	126.9	3089		
Pilastro 40x30	P9	App. A	III	Long.	Punto 1	-----	13	75	39.6	131.9	3002	2986	
Pilastro 40x30	P9	App. A	III	Long.	Punto 2	-----	13	160	39.2	132.0	2970		
Pilastro 30x30	P10	App. A	IV	Trasv.	Punto 1	13	-----	86	29.7	82.2	3613	3571	3559
Pilastro 30x30	P10	App. A	IV	Trasv.	Punto 2	10	-----	152	29.5	83.6	3529		
Pilastro 30x30	P11	App. A	IV	Long.	Punto 1	-----	13	78	29.3	82.8	3539	3567	
Pilastro 30x30	P11	App. A	IV	Long.	Punto 2	-----	14	155	29.2	81.2	3596		
Pilastro 30x30	P12	App. A	IV	Trasv.	Punto 1	14	-----	79	29.3	82.6	3547	3538	
Pilastro 30x30	P12	App. A	IV	Trasv.	Punto 2	14	-----	156	29.0	82.2	3528		

# FASE DI ESTENSIONE – riepilogo dei risultati

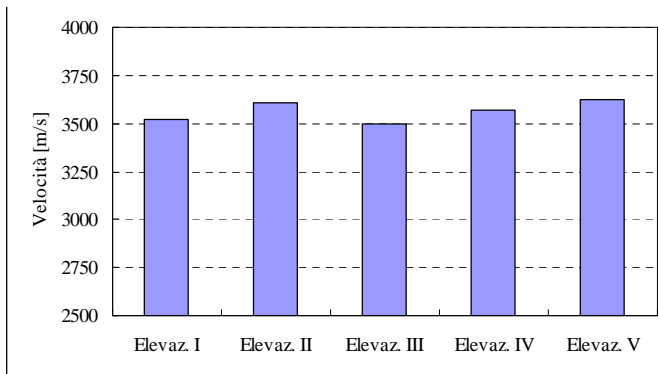
## Velocità $V_{\text{situ}}$ medie di piano



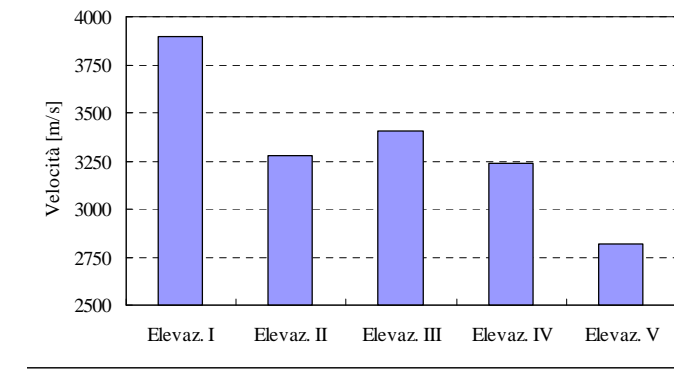
**Edificio 1 – corpo A**



**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	3387	0.07
Ed. 1 - B	3744	0.03	3122	0.11	3707	0.05	3469	0.01	3598	0.05	3528	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

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	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

DENSITÀ

$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	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

RESISTENZA  
CILINDRICA

⊕

$R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	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

RESISTENZA  
CUBICA

⊕

$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	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	0.01	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	-----	-----	9300	0.16	12750	0.26

MODULO  
ELASTICO

# CONCLUSIONI DELL'INDAGINE

- ☐ Dai grafici di dispersione l'ipotesi di distribuzione normale del campione appare confermata.
- ☐ Le grandezze appaiono ben correlate con coeff.  $R^2$  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.

# CONCLUSIONI DELL'INDAGINE

- ❑ 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  $18*1+(18+240)*1/8 \cong 50$ .
- ❑ Nel caso di prove strumentate il costo complessivo dell'indagine calcolato con riferimento al costo unitario della PD strumentata è di  $18*1+(18+240)*1/15 \cong 35$ .
- ❑ 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.