

Corso di aggiornamento professionale

# Vulnerabilità Sismica ed Adeguamento di Costruzioni Esistenti in Calcestruzzo Armato

***7 maggio – 7 giugno 2013***

*Aula Magna Seminario Vescovile Via Puccini, 36 - Pistoia*



ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA DI PISTOIA



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



## ***Valutazione e riduzione della vulnerabilità degli elementi strutturali, non strutturali ed impianti.***

- La conoscenza del manufatto. Indagini in situ distruttive e non distruttive.
- La valutazione della capacità degli elementi strutturali di calcestruzzo armato.
- Il ruolo del confinamento del calcestruzzo e la verifica della duttilità.
- Esempi applicativi: edificio multipiano di calcestruzzo armato ed edificio prefabbricato.

**Rosario Gigliotti**

rosario.gigliotti@uniroma1.it



## PARTE VI

# La conoscenza del manufatto. Indagini in situ distruttive e non distruttive



# Dati necessari per la valutazione

# Dati necessari per la valutazione

- Le fonti da considerare sono:
  - Documenti di progetto
  - Eventuale documentazione acquisita in tempi successivi alla costruzione
  - Rilievo strutturale
  - Prove in-situ ed in laboratorio

# Dati richiesti

- Identificazione dell'organismo strutturale
- Verifica del rispetto dei criteri di regolarità
- Identificazione delle strutture di fondazione
- Identificazione delle categorie del suolo
- Informazioni su:
  - dimensioni geometriche degli elementi strutturali
  - quantitativi delle armature
  - proprietà meccaniche dei materiali

# Dati richiesti

- Informazioni su possibili difetti in:
  - materiali
  - particolari costruttivi (dettagli armature, eccentricità travi-pilastro, pilastro-pilastro ecc.)
- Norme impiegate nel progetto originale
  - e sul fattore di riduzione  $q$ , se adottato
- Destinazione d'uso attuale e futura e rivalutazione dei carichi variabili
- Identificazione della categoria d'importanza
- Eventuali danni subiti e riparazioni effettuate

# Dati richiesti

- La quantità e qualità dei dati acquisiti determina:
  - il metodo di analisi
  - i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali da adoperare nelle verifiche di sicurezza.

# Una situazione reale ...

- Colonia Novarese (RN)
- Proprietario: Comune di Rimini
- Anno Costruzione: 1935 circa
- Interventi Successivi: 1959
- Progetto Architettonico: ritrovato (casualmente!)
- Progetto Esecutivo: non ancora trovato
- Foto gentilmente concesse dal dr. Arch. Miriam Montanari













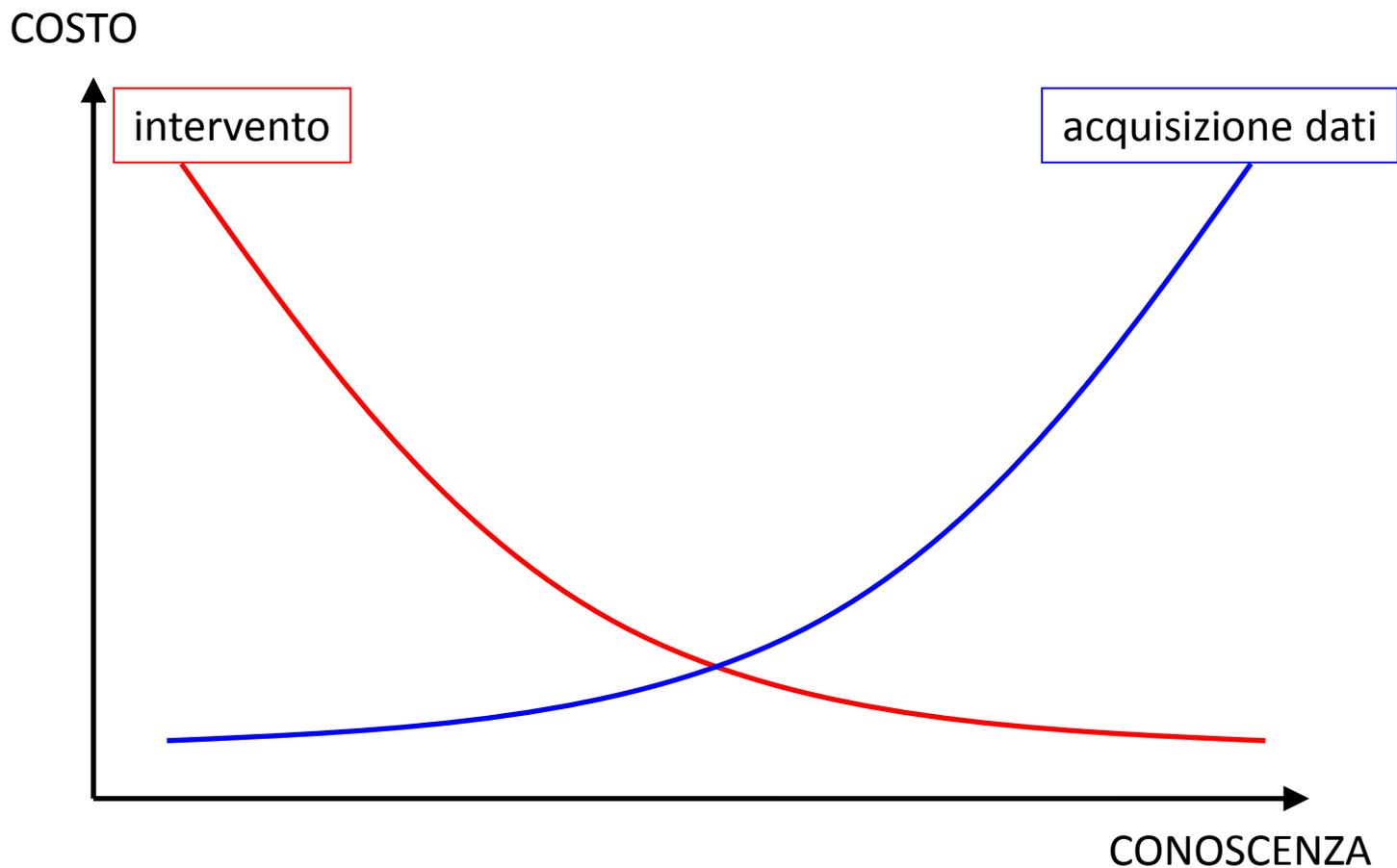
# Livelli di conoscenza

- Per la scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza si distinguono i tre livelli di conoscenza seguenti:
- LC1: Conoscenza **Limitata**
- LC2: Conoscenza **Adeguate**
- LC3: Conoscenza **Accurata**

# Livelli di conoscenza

- Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:
  - **Geometria**  
Caratteristiche geometriche del sistema strutturale
  - **Dettagli strutturali**  
Quantità e disposizione armature
  - **Materiali**  
Proprietà meccaniche dei materiali  
(acciaio, cls, laterizio, malta)

# Importanza del livello di conoscenza



# Dai livelli di conoscenza ai fattori di confidenza

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
<b>LC1</b>	Da disegni di carpenteria originali con <b>rilievo visivo</b> a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca <b>e</b> <i>limitate</i> verifiche in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca <b>e</b> <i>limitate</i> prove in situ	<b>Analisi lineare statica o dinamica</b>	<b>1.35</b>
<b>LC2</b>		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ <b>oppure</b> <i>estese</i> verifiche in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in situ <b>oppure</b> <i>estese</i> prove in situ	<b>Tutti</b>	<b>1.20</b>
<b>LC3</b>		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ <b>oppure</b> <i>esaustive</i> verifiche in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ <b>oppure</b> <i>esaustive</i> prove in situ	<b>Tutti</b>	<b>1.00</b>

# Definizione dei termini

- La definizione dei termini:
  - “visivo”
  - “completo”, “limitato”
  - “estensivo”, “esaustivo”

è quantitativamente definita.

# Definizione dei termini

Tabella C8A.1.3a – Definizione orientativa dei livelli di rilievo e prove per edifici in c.a.

	<b>Rilievo (dei <i>dettagli costruttivi</i>)</b>	<b>Prove (sui materiali)</b>
	<b>Per ogni tipo di elemento “primario” (trave, pilastro...)</b>	
<b>Verifiche limitate</b>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il <b>15%</b> degli elementi	<b>1 provino di cls.</b> per 300 m <sup>2</sup> di piano dell'edificio, <b>1 campione di armatura per 300 m<sup>2</sup></b> di piano dell'edificio
<b>Verifiche estese</b>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il <b>35%</b> degli elementi	<b>2 provini</b> di cls. per 300 m <sup>2</sup> di piano dell'edificio, <b>2 campioni di armatura per 300 m<sup>2</sup></b> di piano dell'edificio
<b>Verifiche esaustive</b>	La quantità e disposizione dell'armatura è verificata per almeno il <b>50%</b> degli elementi	<b>3 provini</b> di cls. per 300 m <sup>2</sup> di piano dell'edificio, <b>3 campioni di armatura per 300 m<sup>2</sup></b> di piano dell'edificio

# Misura delle caratteristiche meccaniche dei materiali in situ

## ● *Calcestruzzo*

- Estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura

## ● *Acciaio*

- Estrazione di campioni ed esecuzione di prove a trazione fino a rottura con determinazione della resistenza a snervamento e della resistenza e deformazione ultima
- Salvo nel caso in cui siano disponibili certificati di prova di entità conforme a quanto richiesto per le nuove costruzioni

# Caratterizzazione armature

Normativa	Denominazione tipo di acciaio	Valori limite di tensione e deformazione				Limitazioni resistenza cls in relazione al tipo di acciaio
		Tens. di Rottura $f_{tk}$ kg/mm <sup>2</sup>	Tensione di Snervamento $f_{yk}$ kg/mm <sup>2</sup>	Tensione Ammissibile $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup>	Allungamento A %	
R.D. 1907	Fe Omogeneo	-	-	10	-	-
R.D. 1928	Fe Omogeneo	8	-	12	27	-
	Fe Colato	50	-	12	21	-
R.D. 1939	Acciaio dolce	42-50	23	14	20	-
	Acciaio semiduro	50-60	27	16	16	-
	Acciaio duro	60-70	31	20	14	-
Circolare M.LL.PP. 1957	Aq 42	42	23	14	20	-
	Aq 50	50	27	16	26	-
	Aq 60	60	31	20	14	-
	Acc. Speciale A	60	44	22	-	$R_{ck} > 25$
	Acc. Speciale B	70	51	26	-	$R_{ck} > 35$
D.M. 1972 n. 190	Fe B 22	34	23	12	24	-
	Fe B 32	50	27	16	23	-
	A 38	46	31	22	14	$R_{ck} > 25$
	A 41	50	44	24	14	-
	Fe B 44	55	51	26	12	$R_{ck} > 35$
D.M. 1976	Fe B 22k	34	22	12	24	-
	Fe B 32k	50	32	16	23	-
	Fe B 38k	46	38	22	14	$R_{ck} > 25$
	Fe B 44k	55	44	26	12	$R_{ck} > 35$

# Misura delle caratteristiche meccaniche dei materiali in situ

- *Metodi di prova non distruttivi*
  - Non possono essere impiegati in sostituzione di quelli sopra descritti, ma sono consigliati a loro integrazione
  - Però, ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive con un più ampio numero di prove non distruttive combinate, tarate su quelle distruttive



# **Criteria di rilievo di edifici in c.a.**

## C8A.1.B.1 Generalità

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

Le **fonti** da considerare per la acquisizione dei dati necessari sono:

- **Documenti di progetto** con particolare riferimento a relazioni geologiche, geotecniche e strutturali ed elaborati grafici strutturali;
- eventuale **documentazione** acquisita in **tempi successivi** alla costruzione;
- **rilievo strutturale** geometrico e dei dettagli esecutivi;
- **prove** in-situ e in laboratorio.

## C8A.1.B.2 Dati richiesti

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

In generale saranno acquisiti dati sugli aspetti seguenti:

- **identificazione dell'organismo strutturale** e verifica del rispetto dei criteri di regolarità indicati al par. 7.2.2 delle NTC. Quanto sopra sarà ottenuto sulla base dei disegni originali di progetto opportunamente verificati con indagini in-situ, oppure con un rilievo ex-novo;
- **identificazione delle strutture di fondazione**;
- **identificazione delle categorie di suolo** secondo quanto indicato al par. 3.2.2 delle NTC;

## C8A.1.B.2 Dati richiesti

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

- informazione sulle **dimensioni geometriche** degli elementi strutturali, dei **quantitativi delle armature**, delle **proprietà meccaniche dei materiali**, dei collegamenti;
- informazioni su possibili **difetti locali** dei materiali;
- informazioni su possibili **difetti nei particolari costruttivi** (dettagli delle armature, eccentricità travi-pilastro, eccentricità pilastro-pilastro, collegamenti trave-colonna e colonna-fondazione, etc.);

## C8A.1.B.2 Dati richiesti

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

- informazioni sulle **norme** impiegate nel progetto originale incluso il valore delle azioni sismiche di progetto;
- descrizione della **classe d'uso**, della **categoria** e della **vita nominale** secondo il par. 2.4 delle NTC;
- rivalutazione dei **carichi** variabili, in funzione della destinazione d'uso;
- informazione sulla natura e l'entità di eventuali **danni** subiti in precedenza e sulle riparazioni effettuate.



## C8A.1.B.2 Dati necessari per la valutazione

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

La quantità e qualità dei dati acquisiti determina il metodo di analisi e i valori dei fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali da adoperare nelle verifiche di sicurezza.

## C8A.1.B.3 Livelli di conoscenza

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

Ai fini della scelta del tipo di analisi e dei valori dei fattori di confidenza, richiamati in C8.7.2.1, si distinguono i tre livelli di

conoscenza seguenti:

- **LC1**: Conoscenza Limitata;
- **LC2**: Conoscenza Adeguata;
- **LC3**: Conoscenza Accurata.

## C8A.1.B.3 Livelli di conoscenza

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

- **geometria**, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali,
- **dettagli strutturali**, ossia la quantità e disposizione delle armature, compreso il passo delle staffe e la loro chiusura, per il c.a., i collegamenti per l'acciaio, i collegamenti tra elementi strutturali diversi, la consistenza degli elementi non strutturali collaboranti,
- **materiali**, ossia le proprietà meccaniche dei materiali.

## C8A.1.B.3 Livelli di conoscenza

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

Il livello di conoscenza acquisito determina il metodo di analisi e i fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali.

Le procedure per ottenere i dati richiesti sulla base dei **disegni di progetto** e/o di **prove in-situ** sono descritte nel seguito per gli edifici in c.a. e acciaio.

La relazione tra livelli di conoscenza, metodi di analisi e fattori di confidenza è illustrata nella Tab. C8A.1.2. La definizione dei termini “visivo”, “completo”, “limitato”, “estensivo”, “esaustivo”, contenuti nella tabella è fornita nel seguito.

# Livelli di Conoscenza LC e Fattori di Confidenza FC

Tabella C8A.1.2 – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
<b>LC1</b>	Da disegni di carpenteria originali con <b>rilievo visivo</b> a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca <b>e</b> <i>limitate</i> verifiche in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca <b>e</b> <i>limitate</i> prove in situ	<b>Analisi lineare statica o dinamica</b>	<b>1.35</b>
<b>LC2</b>		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ <b>oppure</b> <i>estese</i> verifiche in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali con <i>limitate</i> prove in situ <b>oppure</b> <i>estese</i> prove in situ	<b>Tutti</b>	<b>1.20</b>
<b>LC3</b>		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ <b>oppure</b> <i>esaustive</i> verifiche in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ <b>oppure</b> <i>esaustive</i> prove in situ	<b>Tutti</b>	<b>1.00</b>

## C8A.1.B.4 Fattori di confidenza

(NTC 2008 - Allegato alla Circolare)

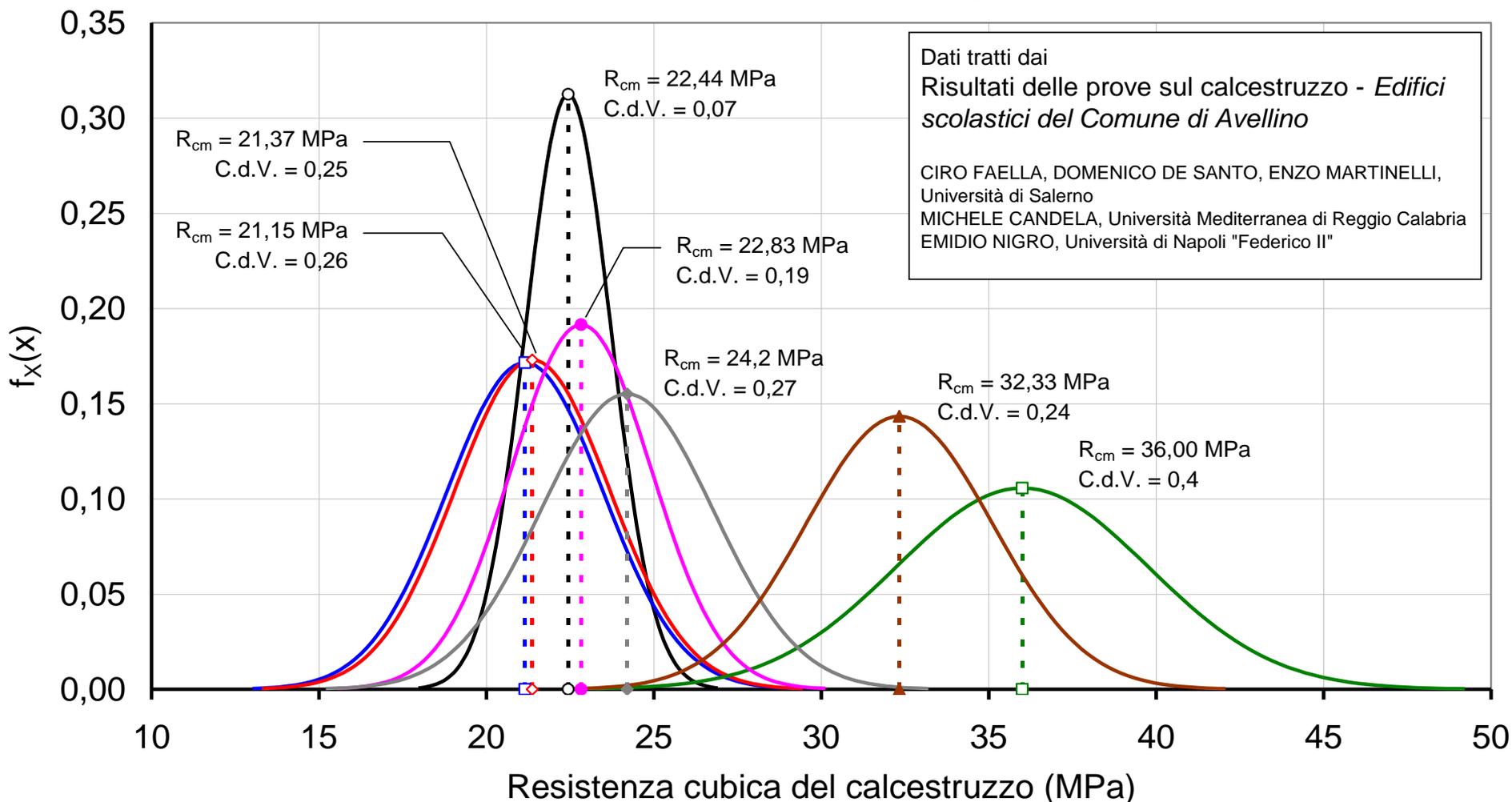
I **Fattori di Confidenza** indicati nella Tabella C8A.2 possono essere utilizzati, in assenza di valutazioni più approfondite, per definire le resistenze dei materiali da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi.

Le resistenze medie, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono divise per i Fattori di Confidenza.

Nel caso di progettazione in presenza di azioni sismiche, i Fattori di Confidenza sono utilizzati anche per gli scopi di cui al § 8.7.2.4.

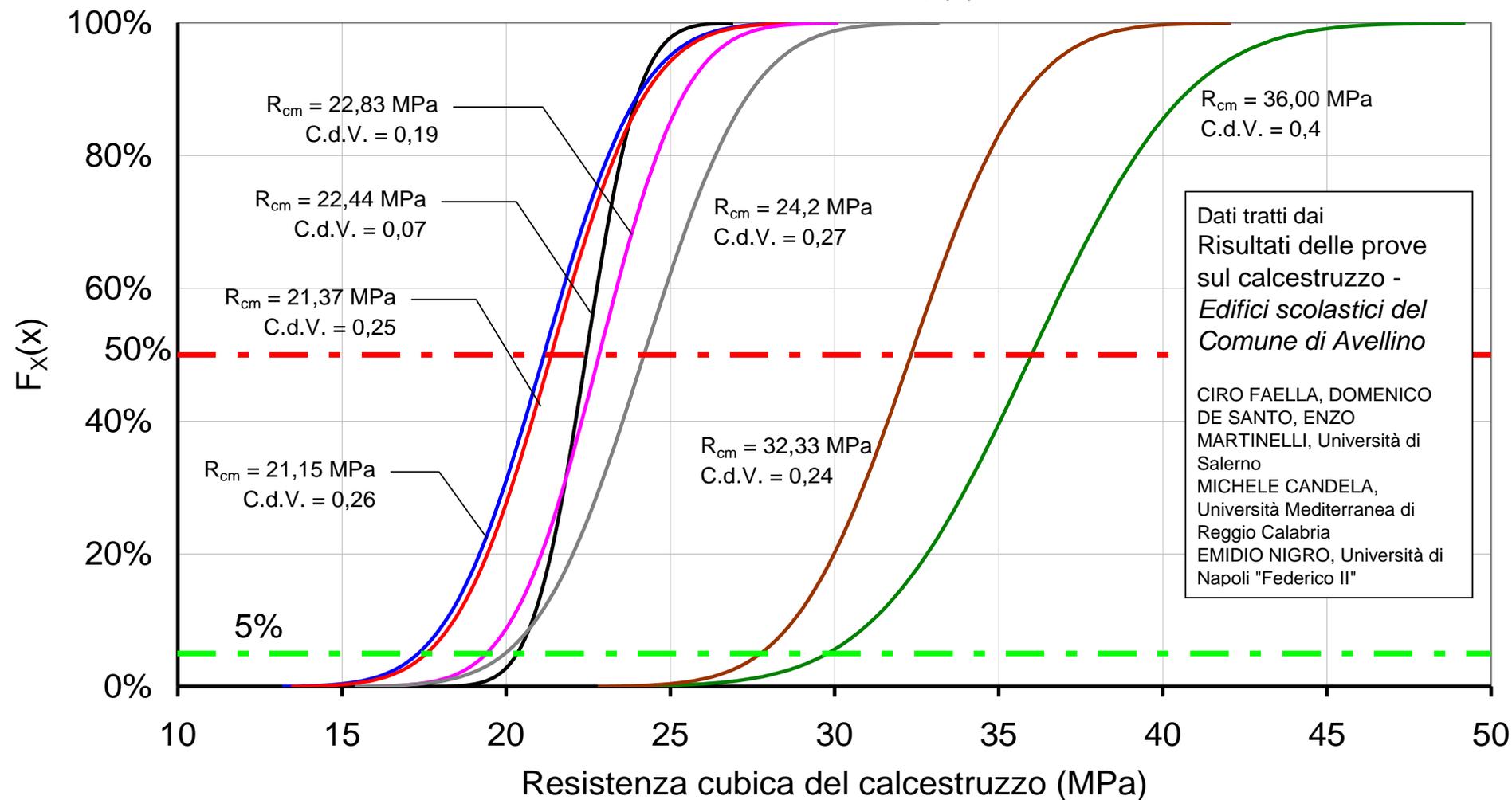
# Esempio: Resistenza del calcestruzzo da prove su campioni

Funzione densità di probabilità  $f_x(x)$



# Esempio: Resistenza del calcestruzzo da prove su campioni

Funzione di Probabilità  $F_X(x)$



### 2.4.4.5 Material Properties

Expected material properties shall be based on mean values of tested material properties. Lower bound material properties shall be based on mean values of tested material properties minus one standard deviation ( $\sigma$ ).

Nominal material properties, or properties specified in construction documents, shall be taken as lower bound material properties unless otherwise specified in Chapters 5 through 8. Corresponding expected material properties shall be calculated by multiplying lower-bound values by appropriate factors specified in Chapters 5 through 8 to translate from lower bound to expected values.

#### 2.4.4.6.2 Nonlinear Procedures

If nonlinear procedures are used, component capacities for deformation-controlled actions shall be taken as permissible inelastic deformation limits, and component capacities for force-controlled actions shall be taken as lower-bound strengths,  $Q_{CL}$ , as summarized in Table 2-2.

#### 2.4.4.6.3 Linear Procedures

If linear procedures are used, capacities for deformation-controlled actions shall be defined as the product of  $m$ -factors and expected strengths,  $Q_{CE}$ . Capacities for force-controlled actions shall be defined as lower-bound strengths,  $Q_{CL}$ , as summarized in Table 2-3.

**Table 2-2** Calculation of Component Action Capacity—Nonlinear Procedures

Parameter	Deformation-Controlled	Force-Controlled
Deformation Capacity—Existing Component	$\kappa \cdot$ deformation limit	N/A
Deformation Capacity—New Component	deformation limit	N/A
Strength Capacity—Existing Component	N/A	$\kappa \cdot Q_{CL}$
Strength Capacity—New Component	N/A	$Q_{CL}$

**Note:** Capacity reduction ( $\phi$ ) factors shall be taken as unity in the evaluation of capacities.

**Table 2-3** Calculation of Component Action Capacity—Linear Procedures

Parameter	Deformation-Controlled	Force-Controlled
Existing Material Strength	Expected mean value with allowance for strain hardening	Lower-bound value (approximately mean value $-1\sigma$ level)
Existing Action Capacity	$\kappa \cdot Q_{CE}$	$\kappa \cdot Q_{CL}$
New Material Strength	Expected material strength	Specified material strength
New Action Capacity	$Q_{CE}$	$Q_{CL}$

**Note:** Capacity reduction ( $\phi$ ) factors shall be taken as unity in the evaluation of capacities.

**Table 6-3** Default Lower-Bound Compressive Strength of Structural Concrete (psi)

Time Frame	Footings	Beams	Slabs	Columns	Walls
1900–1919	1000–2500	2000–3000	1500–3000	1500–3000	1000–2500
1920–1949	1500–3000	2000–3000	2000–3000	2000–4000	2000–3000
1950–1969	2500–3000	3000–4000	3000–4000	3000–6000	2500–4000
1970–Present	3000–4000	3000–5000	3000–5000	3000–10000	3000–5000

### 6.3.2.5 Default Properties

Use of default material properties to determine component strengths shall be permitted in conjunction with the linear analysis procedures of Chapter 3.

Default lower-bound concrete compressive strengths shall be taken from Table 6-3. Default expected strength concrete compressive strengths shall be determined by multiplying lower-bound values by an appropriate factor selected from Table 6-4 unless another factor is justified by test data. The appropriate default compressive strength—lower bound or expected strength as specified in Section 2.4.4—shall be used to establish other strength and performance characteristics for the concrete as needed in the structural analysis.

**Table 6-4** Factors to Translate Lower Bound Material Properties to Expected Strength Material Properties

Material Property	Factor
Concrete Compressive Strength	1.50
Reinforcing Steel Tensile & Yield Strength	1.25
Connector Steel Yield Strength	1.50

### 6.3.4 Knowledge Factor

A knowledge factor ( $\kappa$ ) for computation of concrete component capacities and permissible deformations shall be selected in accordance with Section 2.2.6.4 with the following additional requirements specific to concrete components.

A knowledge factor,  $\kappa$ , equal to 0.75 shall be used if any of the following criteria are met:

1. Components are found damaged or deteriorated during assessment, and further testing is not performed to quantify their condition or justify the use of  $\kappa=1.0$ .
2. Component mechanical properties have a coefficient of variation exceeding 25%.
3. Components contain archaic or proprietary material and the condition is uncertain.

## C8A.1.B.4 Fattori di confidenza

I Fattori di Confidenza possono anche essere valutati in modo differenziato per i diversi materiali, sulla base di **considerazioni statistiche** condotte su un **insieme di dati significativo** per gli elementi in esame e di **metodi di valutazione di comprovata validità**.

# Fattori di confidenza

L'attuale quadro normativo italiano ed europeo riconosce il maggior grado di incertezza delle varie grandezze rilevate negli edifici esistenti rispetto a quelle usate negli edifici di nuova progettazione.

Rispetto a questi ultimi, infatti, alle **incertezze di natura intrinseca** si aggiungono quelle **di natura epistemica**, cioè quelle derivanti da un'attività diagnostica inevitabilmente imperfetta.



# Fattori di confidenza

Ci si riferisce in particolare al fatto che **ogni grandezza meccanica è intrinsecamente aleatoria**, cioè variabile in maniera casuale.

L'aleatorietà può essere descritta attraverso una **curva di distribuzione probabilistica** in funzione di un numero limitato di parametri.

# Fattori di confidenza

A titolo di esempio, per le distribuzioni più diffuse quali la *normale* e la *lognormale*, i parametri si riferiscono alla **media** ed alla **dispersione**.

Tali valori forniscono univocamente una descrizione quantitativa dell'*aleatorietà* delle grandezze meccaniche.

**N.B.** L'aleatorietà, in quanto intrinseca, non è riducibile, anche eseguendo un numero molto elevato di prove.

# Fattori di confidenza

I parametri della distribuzione sono essi stessi delle variabili di incerta determinazione, poiché la loro corretta determinazione dipende dal numero di prove eseguite.

Questa **incertezza** è però di natura diversa ed è definita **epistemica**, cioè legata all'attività di conoscenza (sperimentale), e **può essere ridotta all'aumentare del numero di prove.**

L'attività conoscitiva, espressa dal numero di prove eseguite, definisce quindi la confidenza che si ha in tali parametri.

# Fattori di confidenza

	<i>Aleatorietà intrinseca</i>		<i>Incertezza epistemica</i>		
	<i>Livello</i>	<i>Riducibile</i>	<i>Livello</i>	<i>Riducibile</i>	<i>“Raggio” di propagazione dell’informazione</i>
Geometria	Basso	Si trascura	Basso	Eseguendo rilievi	Lungo
Dettagli costruttivi	Basso	No	Alto	Eseguendo saggi	Corto
Materiali	Alto	No	Basso	Eseguendo prove D e ND	All’interno della zona omogenea



# Fattori di confidenza

Una **popolazione statistica** è l'insieme di tutti gli individui riguardo ai quali si cercano informazioni.

In genere è possibile osservare solo una frazione relativamente piccola, detta **campione**, del numero totale di individui presenti in una popolazione statistica.

# Fattori di confidenza

Il termine *statistica* viene usato, in genere, per designare una quantità calcolata in base ai dati del campione; mentre il termine *parametro* viene usato per designare una quantità caratteristica di una popolazione.

**In una stima statistica, l'obiettivo è quello di ottenere stime dei parametri caratteristici di una popolazione, date le osservazioni in un campione.**

# Fattori di confidenza

Il numero di parametri necessari a descrivere la popolazione dipende dalla forma della distribuzione in frequenza.

Se la forma è quella di una *distribuzione normale*, la distribuzione in frequenza è completamente descritta da due parametri: la *media della popolazione*, denominata  $\mu$ , e la *deviazione standard della popolazione*, detta  $\sigma$ .

# Fattori di confidenza

La **media campionaria**, ossia valutata sul campione, denominata  $\bar{X}$ , fornisce generalmente una stima della **media  $\mu$  della popolazione**.

In questi stessi casi, la **deviazione standard del campione**, denominata  $s$ , fornisce generalmente una stima della **deviazione standard  $\sigma$  della popolazione**.

# Fattori di confidenza

Esistono diversi metodi statistici per ottenere da uno o più campioni stime dei parametri caratteristici della popolazione di appartenenza.

Per la valutazione delle resistenze dei materiali nelle strutture si possono adottare due differenti approcci basati su:

**distribuzione t di Student;**

**teoria dell'aggiornamento bayesiano.**

# Fattori di confidenza

## La distribuzione t di Student

La distribuzione T di Student viene usata in statistica per stimare il valore medio di una popolazione quando sia disponibile un campione di piccole dimensioni (meno di 30 elementi) e i valori sono distribuiti come una variabile casuale normale.

# Fattori di confidenza

## La distribuzione t di Student

$\alpha$  = livello di significatività

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{s^2/n}}$$

### 1 campione

$$FC = \frac{\bar{X}}{\mu_{1-\alpha}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot CV \cdot t_{1-\alpha; n-1}}$$

### 2 campioni

$$FC = \frac{\bar{X}_p}{\mu_{1-\alpha}^*} = \frac{\bar{X}_p}{\bar{X}_p - (|\bar{X}_A - \bar{X}_B| + c)}$$

$$c = t_{1-\alpha/2} \cdot s_{\bar{X}_A - \bar{X}_B}$$

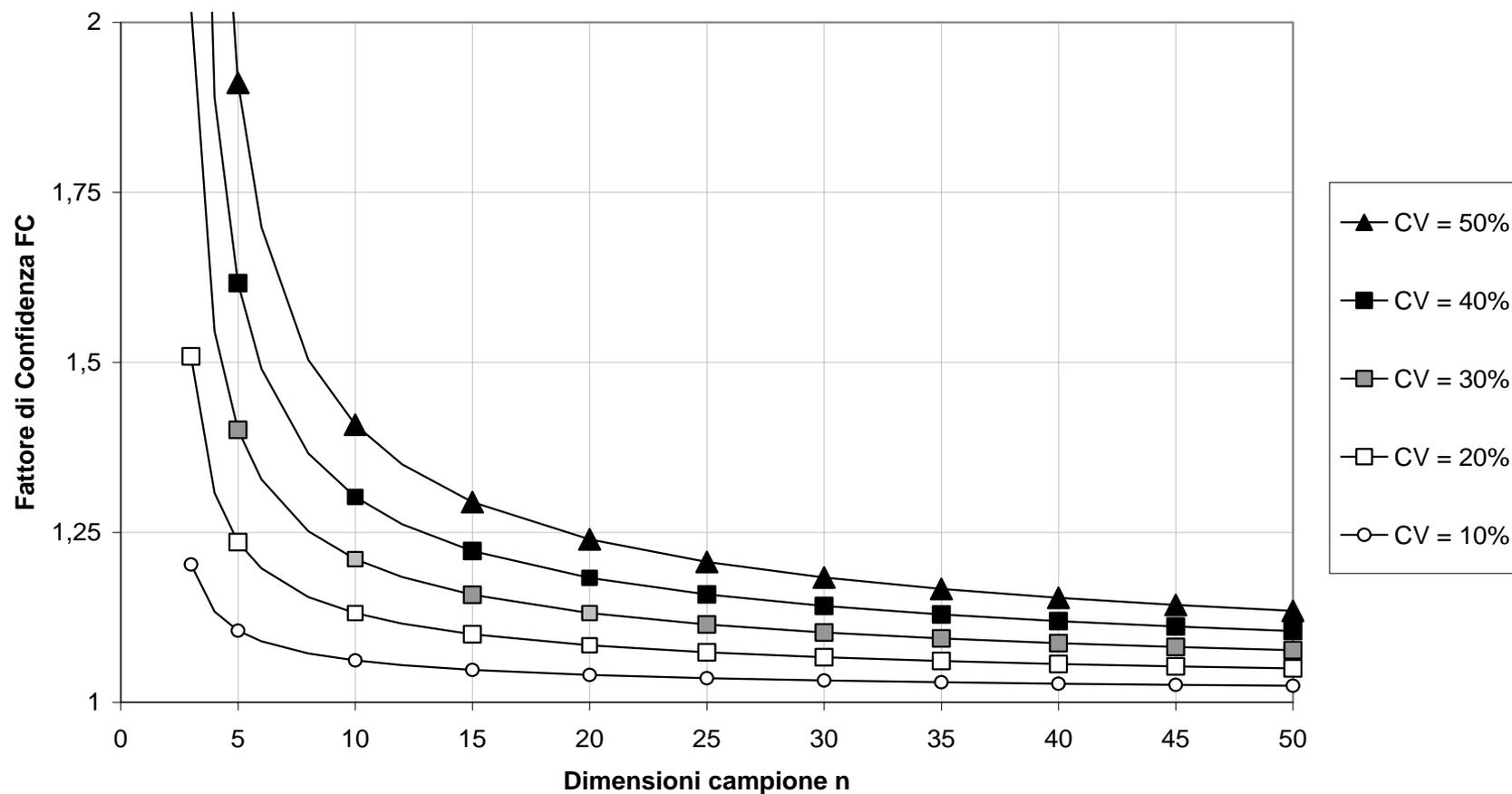
$$s_{\bar{X}_A - \bar{X}_B} = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 \left( \frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B} \right)}$$

$$\mu_{1-\alpha}^* = \bar{X}_p - \Delta\mu_{1-\alpha}^* \quad \Delta\mu_{1-\alpha}^* = |\mu_A - \mu_B|_{1-\alpha} = |\bar{X}_A - \bar{X}_B| + c$$

# Fattori di confidenza

## La distribuzione t di Student (esempio)

Confidenza =  $1-\alpha = 95\%$  (distribuzione t-Student)





# Fattori di confidenza

## Un metodo bayesiano

In questo metodo, il cui fondamento è legato alla teoria dell'aggiornamento bayesiano, è possibile combinare dati da prove distruttive e non distruttive con un'eventuale informazione a priori.

# Fattori di confidenza

## Un metodo bayesiano

$$FC = 0.9 + 0.2\sqrt{\sigma_{\mu}}$$

$$\sigma_{\mu} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \frac{n_{MD}}{\sigma_{MD}^2 + \sigma_{t,MD}^2} + \frac{n_{MND}}{\sigma_{MND}^2 + \sigma_{t,MND}^2}}}$$

$$\mu = \left[ \frac{\mu' + n_{MD} \cdot \mu_{MD} + n_{MND} \cdot \mu_{MND}}{1 + n_{MD} + n_{MND}} \right]$$

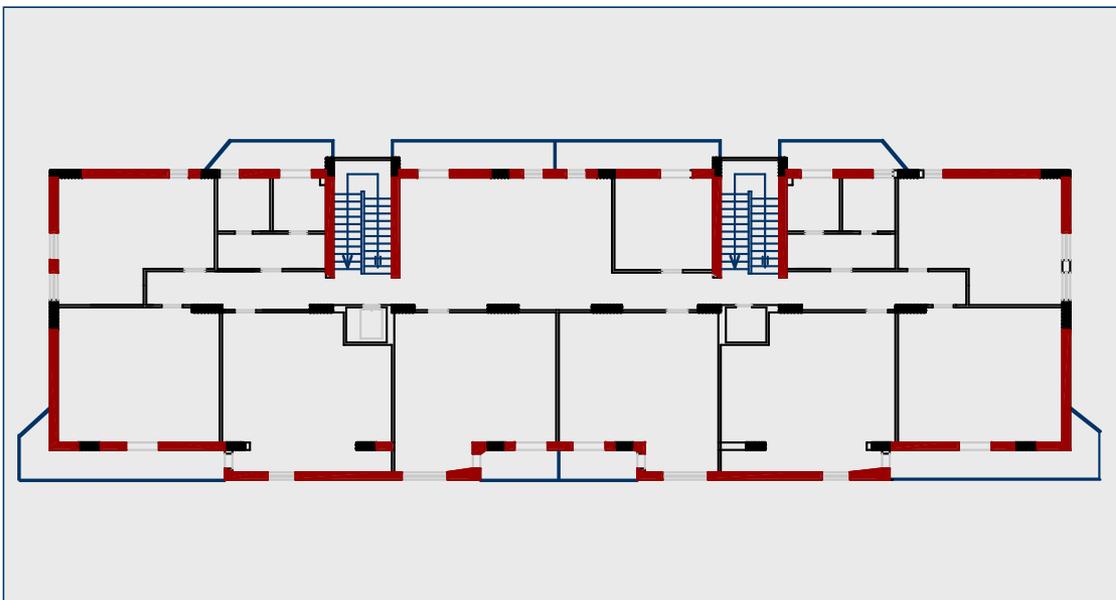
$\mu'$  = valore medio a priori



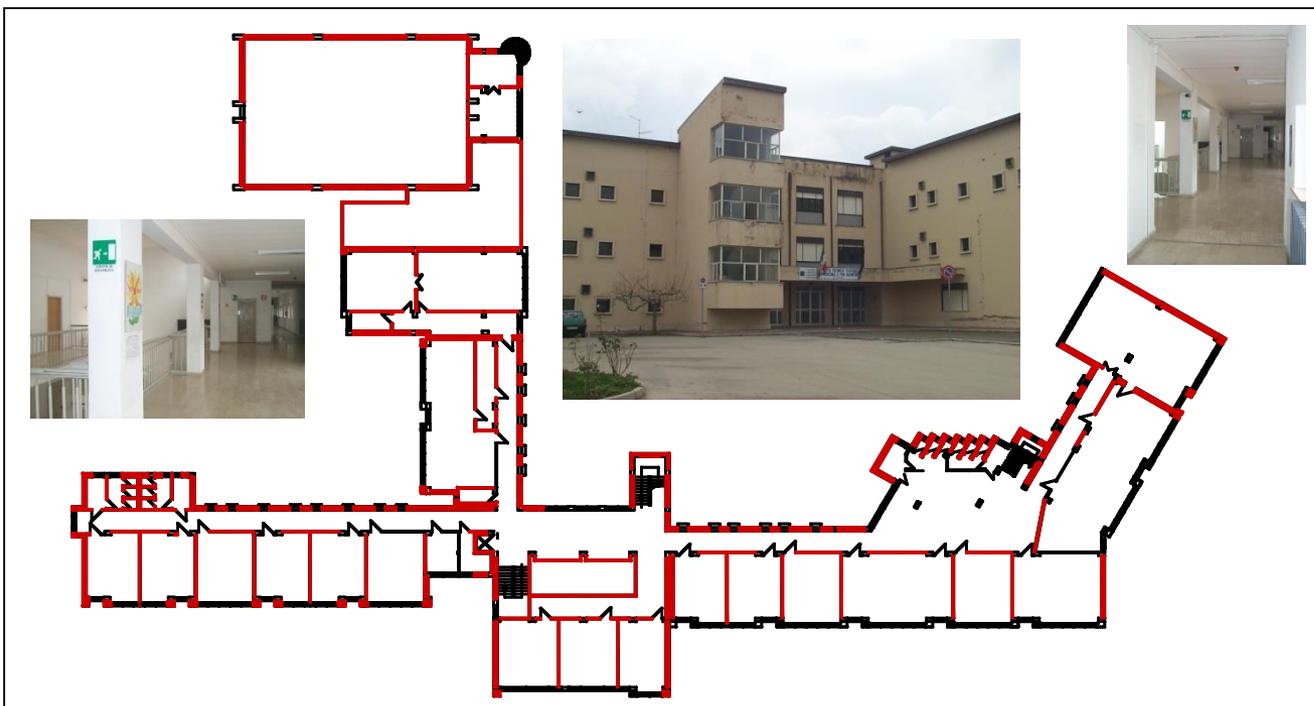
## ESEMPI DI RILIEVO DI EDIFICI IN C.A.



# Esempi di rilievo

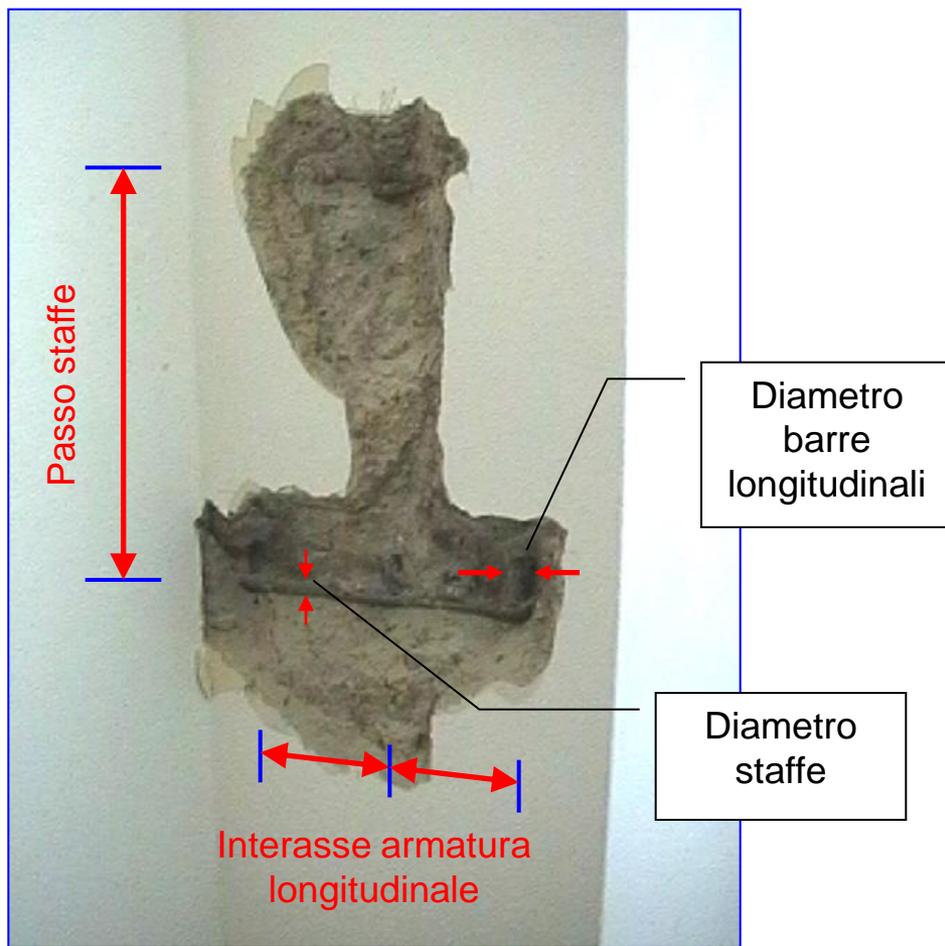


# Organismo strutturale complesso



# Saggi sugli elementi strutturali

finalizzati all'individuazione delle armature (tipo, diametri ed interassi)

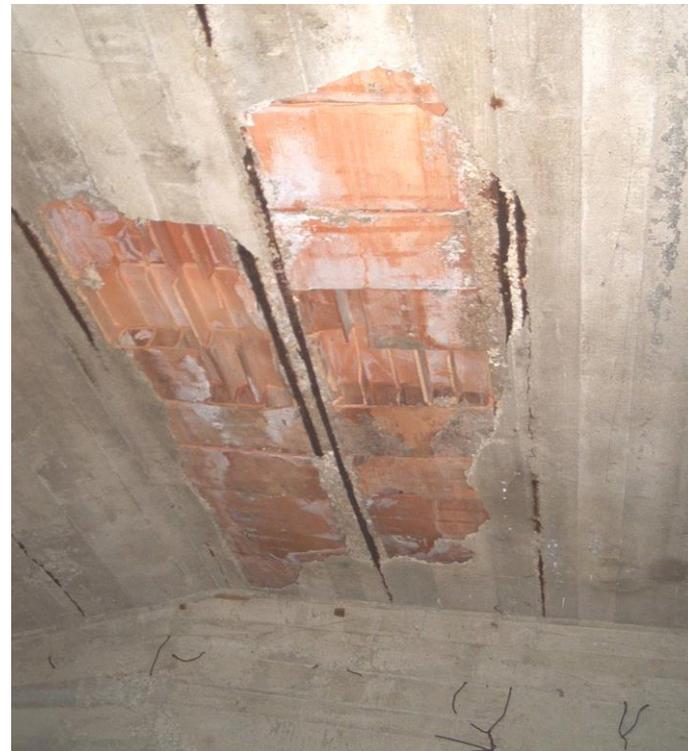


# Saggi sugli elementi strutturali

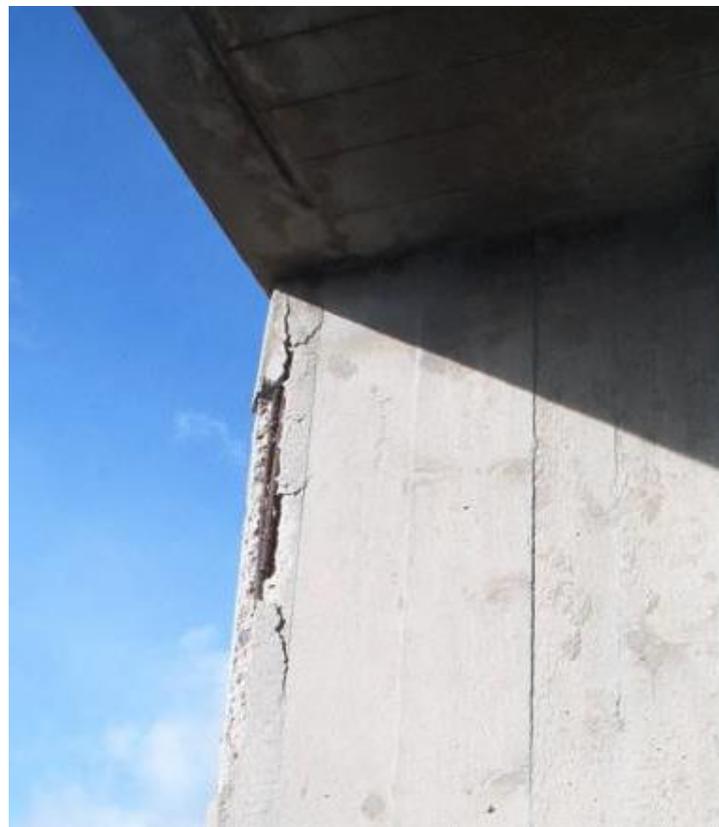
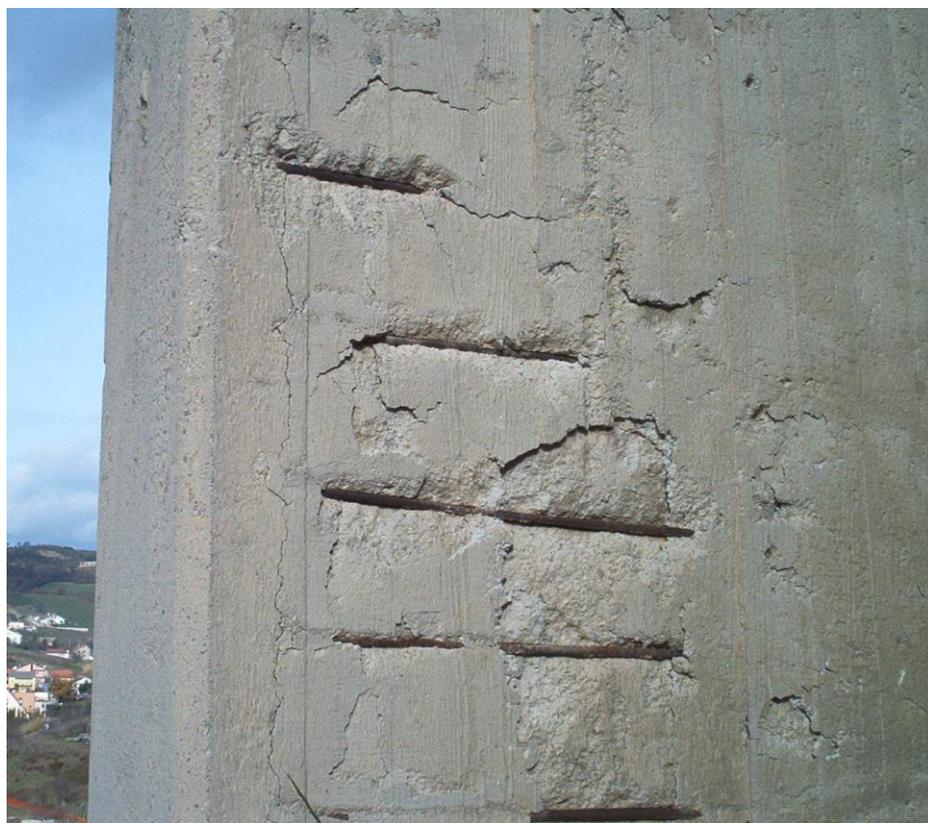
Saggi sugli elementi strutturali finalizzati all'individuazione delle armature (tipo, diametri ed interassi)



# Degrado strutturale



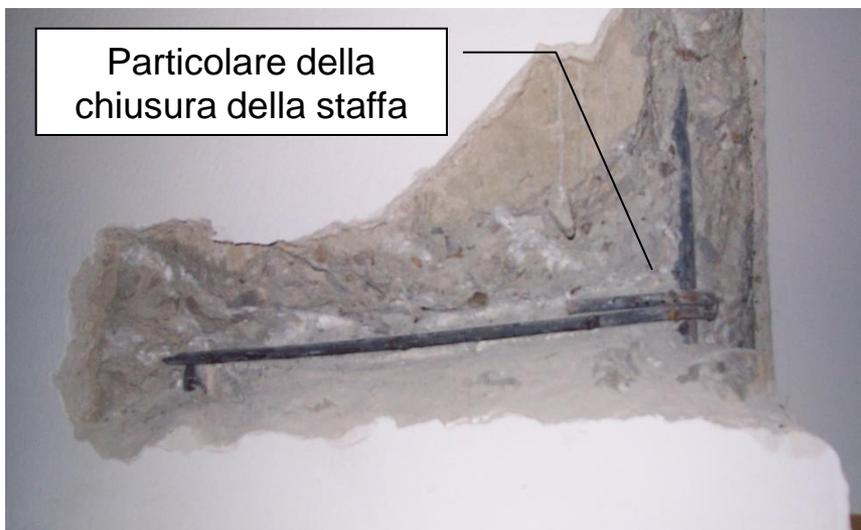
# Degrado strutturale



# Saggi sugli elementi strutturali

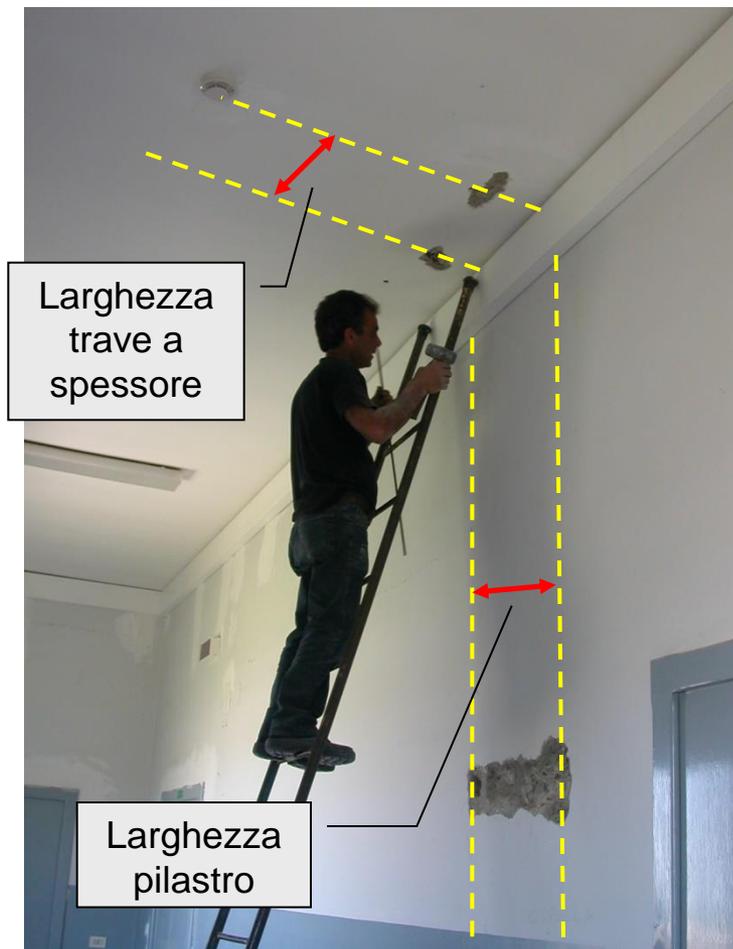


Particolare della  
chiusura della staffa



**Saggi** sugli elementi strutturali finalizzati all'individuazione delle armature (tipo, diametri, interassi, dettagli costruttivi) e successivo **ripristino**

# Saggi



# Individuazione delle caratteristiche strutturali



Saggi sul solaio finalizzato all'individuazione della tipologia strutturale e degli spessori (ove necessario anche delle armature)

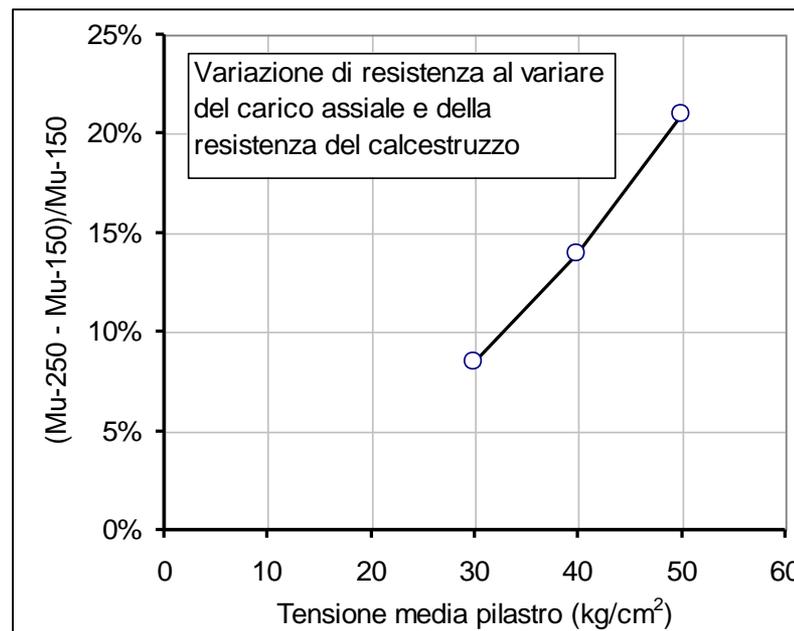
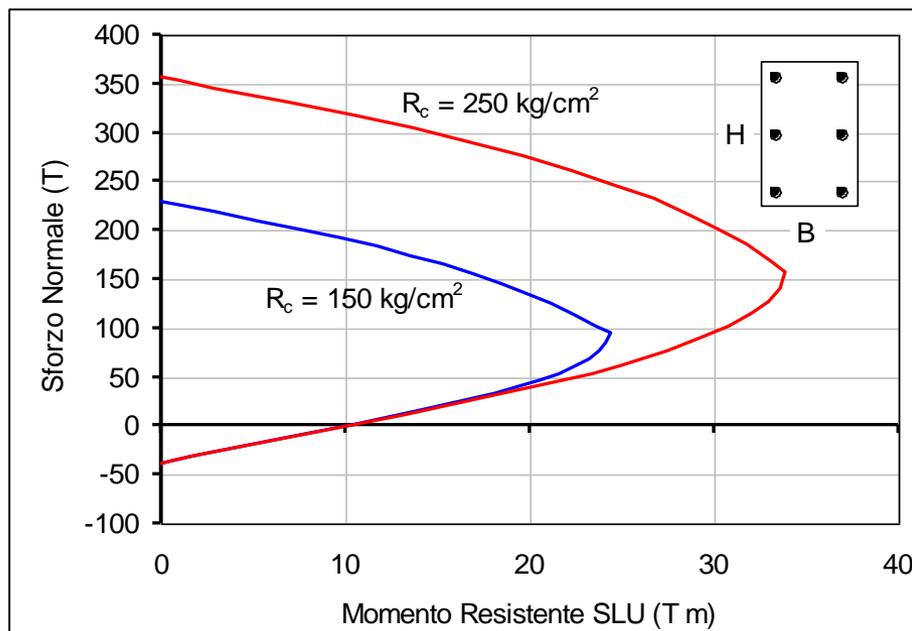
Rimozione della chiusura del cassonetto per la misura delle dimensioni della trave perimetrale.

# Rilievo geometrico

Misura delle  
dimensioni dei  
**giunti strutturali**



# Valutazioni preliminari sulla resistenza finalizzate alla definizione del programma di prove sui materiali (distruttive e non distruttive)



*Domini di resistenza allo SLU di una sezione rettangolare in c.a. (B=30cm, H=60cm, diametro barre = 18 mm) con differenti valori della resistenza a compressione del calcestruzzo.*



# Indagini e metodi per la stima della resistenza del calcestruzzo in-situ

# Prove sul calcestruzzo

Caratteristiche principali dei metodi più diffusi per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo.

<b>PROVA</b>	Costo	Rapidità	Danno str.	Rappresentatività	Affidabilità
Carotaggio	alto	bassa	moderato	moderata	buona
Sonde Windsor	medio	alta	minimo	superficiale	scarsa
Ultrasuoni	basso	alta	nullo	buona	moderata
Sclerometro	minimo	alta	nullo	superficiale	scarsa

# Prove sul calcestruzzo

## Il carotaggio

*Il carotaggio consiste nel prelievo di campioni cilindrici detti carote mediante carotatrici a corona diamantata.*

*Il prelievo di carote da strutture in opera é regolato dalla norma UNI EN 12504 – 1 [UNI 2002] che indica, come criterio fondamentale da adottare nella esecuzione di tali prelievi, quello di ridurre al minimo il danneggiamento del campione nel corso delle operazioni di estrazione.*

# Prove sul calcestruzzo

## Il carotaggio

*In particolare, durante le operazioni di estrazione, la carotatrice va adeguatamente ancorata in modo che avanzando non subisca vibrazioni tali da rovinare il campione, che deve avere diametro costante ed asse rettilineo.*

*Il **diametro delle carote** deve essere non minore di tre volte la dimensione massima dell'aggregato, mentre l'altezza deve essere possibilmente pari a due volte il diametro.*

# Prove sul calcestruzzo

## Il carotaggio

*La resistenza misurata sulle carote risente di numerosi **fattori** che la differenziano da quella che si misurerebbe su un equivalente provino standard. Tali fattori sono in particolare:*

- 1. diverse modalità di preparazione e stagionatura;*
- 2. differente età di stagionatura tra carota e provino standard;*
- 3. posizione del prelievo nell'ambito dell'elemento strutturale (ad es. al piede o alla testa di un pilastro, parallelamente o ortogonalmente alla direzione di getto);*
- 4. disturbo che inevitabilmente consegue alle operazioni di prelievo;*
- 5. dimensioni delle carote (ad es. nel caso di microcarote o con H/D diverso da 2);*
- 6. presenza di armature incluse.*

# Prove sul calcestruzzo

## Il carotaggio

*Per quanto l'effetto di alcuni dei fattori su elencati (ad es. 4) e 6)) possa essere eliminato o ridotto conducendo in maniera accurata le operazioni di prelievo, essi tendono in generale a far sottostimare la resistenza rispetto a quella degli analoghi provini standard.*

*Per correggere ciò si fa ricorso a coefficienti correttivi opportunamente calibrati.*

# Prove sul calcestruzzo

## Il carotaggio

Le carote possono essere utilizzate anche per valutare il **legame tensioni-deformazioni** del calcestruzzo, acquisendo le deformazioni del campione durante le prove di compressione mediante trasduttori di spostamento o strain-gauges.

*In alternativa, le proprietà meccaniche (modulo elastico, resistenza a trazione, ecc.), possono essere valutate sulla base della resistenza a compressione utilizzando espressioni fornite in alcune normative (ad es. DM 9/1/96, Eurocodice 2).*

# Prove sul calcestruzzo

## I METODI NON DISTRUTTIVI

I metodi di prova non distruttivi più diffusi per la stima delle proprietà meccaniche del calcestruzzo sono:

il metodo sclerometrico,

il metodo ultrasonico

il metodo combinato Sonreb.

# Prove sul calcestruzzo

## Le prove sclerometriche

L'utilizzo dello sclerometro é regolamentato dalla norma UNI EN 12504 – 2 [UNI 2001].

Esso è molto diffuso nella pratica professionale corrente, ma rivela una scarsa affidabilità nella determinazione della resistenza.

# Prove sul calcestruzzo

## Le prove sclerometriche

Lo sclerometro é costituito da una **massa battente d'acciaio**, azionata da una molla, che contrasta un'asta di percussione a contatto della superficie di prova.

Il metodo consiste nel misurare l'altezza di rimbalzo della massa, dopo che questa é stata proiettata, con una data energia, contro la superficie da saggiare; mediante delle curve, in dotazione allo strumento o diversamente ottenute, l'**indice sclerometrico**, proporzionale all'altezza di rimbalzo, è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo.

# Prove sul calcestruzzo

## Le prove sclerometriche

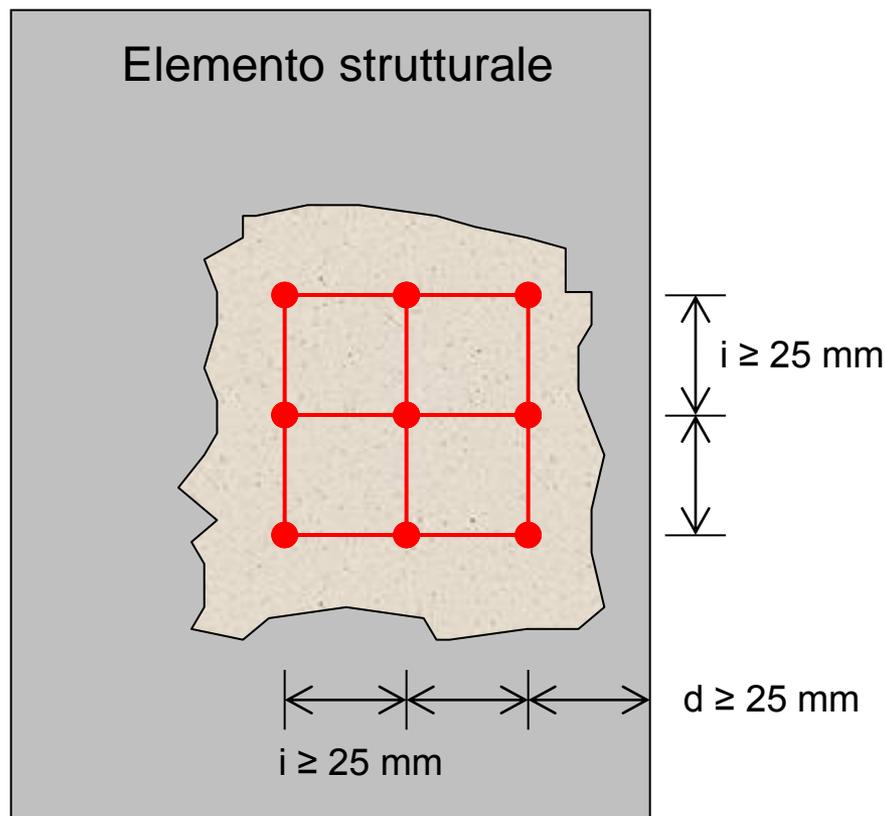
La norma UNI 9189 precisa che lo sclerometro può essere utilizzato per valutare la omogeneità del calcestruzzo in situ, per delimitare zone di calcestruzzo degradato o di scarsa qualità e per stimare le variazioni nel tempo delle proprietà del calcestruzzo,

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.

# Prove sclerometriche

UNI EN 12504 – 2 [UNI 2001]



Utilizzare un **minimo di nove misure** per ottenere una stima affidabile dell'indice sclerometrico di un'area di prova. Registrare la posizione e l'orientamento dello sclerometro per ciascuna serie di misurazioni.

Assicurarsi che la **distanza tra due punti di impatto** sia non meno di 25 mm e che nessuno sia a meno di 25 mm da un bordo.

**Nota** È consigliabile disegnare una regolare **griglia di linee distanti da 25 mm a 50 mm** l'una dall'altra e considerare le intersezioni delle linee come punti di prova.

# Prove sul calcestruzzo

## Le prove ultrasoniche

*La prova, regolamentata dalla norma UNI EN 12504 – 4 [UNI, 2005], consiste nel misurare il tempo impiegato da **onde soniche** di adeguata frequenza (40-120 KHz) ad attraversare un mezzo compreso tra due trasduttori collocati ad una data distanza, ricavandone la **velocità di propagazione**.*



# Prove sul calcestruzzo

## Le prove ultrasoniche

*Le letture possono essere effettuate in diversi modi legati alla **posizione relativa dei due trasduttori**, ma il modo più corretto per effettuare le letture, e quindi da utilizzare sempre laddove possibile, è quello **per trasparenza**, cioè con **i due trasduttori disposti in contrapposizione su due superfici tra loro parallele**.*

# Prove sul calcestruzzo

## Le prove ultrasoniche

*Le letture possono essere effettuate in diversi modi legati alla **posizione relativa dei due trasduttori**, ma il modo più corretto per effettuare le letture, e quindi da utilizzare sempre laddove possibile, è quello **per trasparenza**, cioè con **i due trasduttori disposti in contrapposizione su due superfici tra loro parallele**.*

*Come per il metodo sclerometrico, esistono curve che correlano la velocità ultrasonica alla resistenza del conglomerato, ma anche in questo caso la utilizzazione diretta di tali correlazioni comporta una stima poco affidabile della resistenza.*

# Prove sul calcestruzzo

## Rappresentazione schematica delle prove ultrasoniche

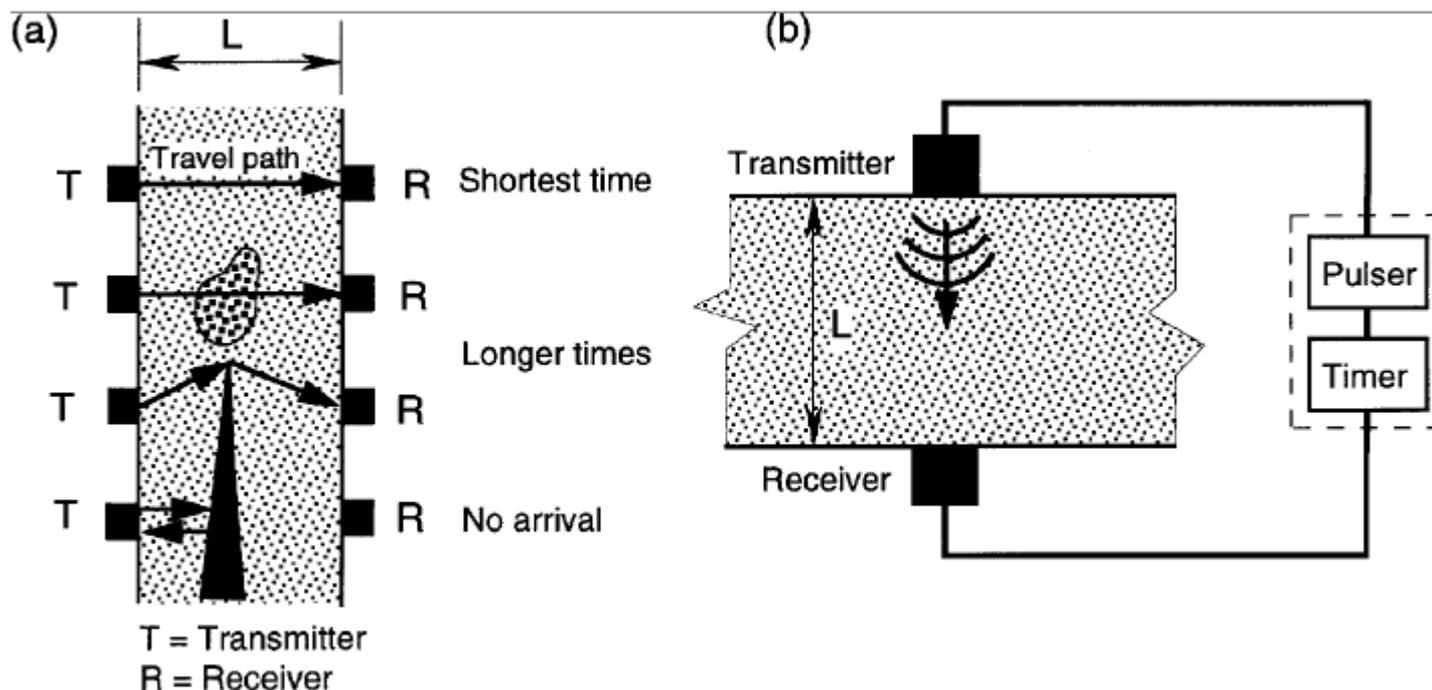


Fig. 1 – (a) Effetti dei difetti nel tempo di percorrenza di una pulsazione ultrasonica; (b) schema del sistema di trasmissione

# Prove sul calcestruzzo

## Metodo della trasmissione ultrasonica - Principi

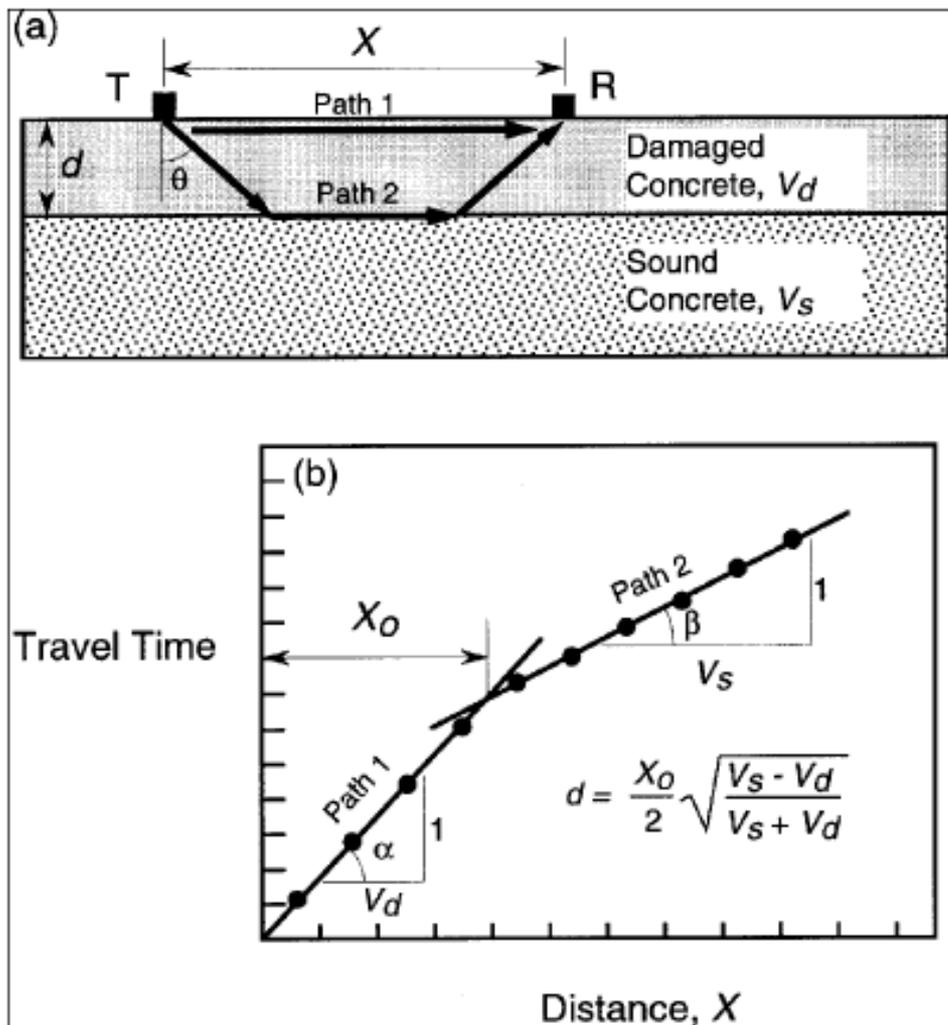


Fig. 3 – (a) Percorsi d’onda per prove ultrasoniche sulla superficie di un calcestruzzo con uno strato superficiale danneggiato;

(b) tempo di percorrenza come funzione della distanza tra trasmettente e ricevente.

# Prove sul calcestruzzo

## Il metodo Sonreb

*Per ridurre gli errori commessi con le due metodologie sopra descritte é stato sviluppato il metodo combinato SONREB, regolamentato dalla norma RILEM NDT 4 [RILEM, 1993].*

*Si é infatti notato che il **contenuto di umidità** fa sottostimare l'indice sclerometrico e sovrastimare la velocità ultrasonica, e che, all'aumentare dell'**età del calcestruzzo**, l'indice sclerometrico aumenta mentre la velocità ultrasonica diminuisce.*

# Prove sul calcestruzzo

## Il metodo Sonreb

*L'uso combinato delle due prove consente quindi di compensare in parte gli errori commessi usando singolarmente le due metodologie.*

*L'applicazione del metodo Sonreb richiede la valutazione dei **valori locali della velocità ultrasonica  $V$**  e dell'**indice di rimbalzo  $S$** , a partire dai quali è possibile ottenere la **resistenza del calcestruzzo  $R_c$**  mediante espressioni del tipo:*

$$R_c = a S^b V^c$$

# Il metodo Sonreb

In bibliografia vengono fornite numerose espressioni del tipo  $R_c = a V^b S^c$ , tra le altre:

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

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

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

in cui  $R_c$  è la resistenza cubica a compressione in [N/mmq],  $S$  è l'indice sclerometrico e  $V$  è la velocità ultrasonica in [m/s].

# Il metodo Sonreb

## Il metodo Sonreb: definizione dei parametri di correlazione

(coefficienti a, b, c)

Se si dispone di dati ottenuti con **indagini non distruttive**, i risultati ottenuti dai **carotaggi**, effettuati negli stessi punti, possono essere utilizzati per calibrare tali dati.

Si raccomanda in particolare di usare il metodo Sonreb e di ricavare l'espressione  $R_c = a S^b V^c$ , valida specificamente per il calcestruzzo in esame effettuando una **regressione** basata sui risultati delle prove sulle carote.

# Il metodo Sonreb

## Il metodo Sonreb: definizione dei parametri di correlazione (coefficienti a, b, c)

Nota la **resistenza cilindrica a compressione delle carote**  $f_{car}$  prelevate, l'**indice di rimbalzo S** e la **velocità ultrasonica V**, ottenute dalle prove non distruttive effettuate prima dei carotaggi, è possibile determinare i coefficienti a, b e c delle curve Sonreb mediante una **regressione non lineare**, in modo da ottenere l'espressione valida specificamente per il caso in esame:  $R_c = a S^b V^c$

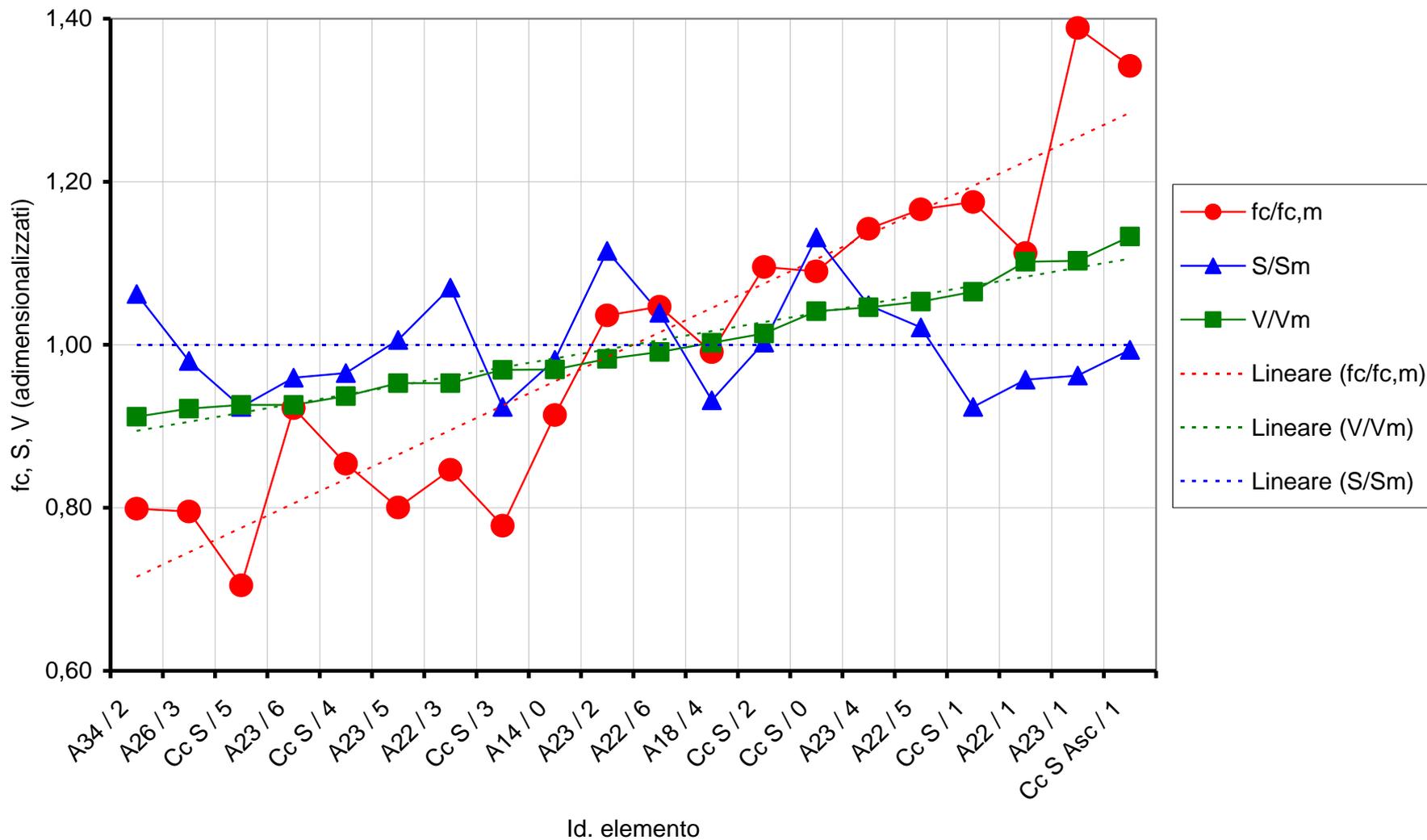
# Il metodo Sonreb

## Il metodo Sonreb: definizione dei parametri di correlazione (coefficienti a, b, c)

Applicando la su riportata relazione è possibile stimare le resistenze  $R_c$  anche nei punti in cui siano state effettuate solo prove non distruttive, in modo da determinare il valore medio della resistenza del calcestruzzo in esame utilizzando i risultati delle prove distruttive e non distruttive, dunque un campione più ampio e rappresentativo.

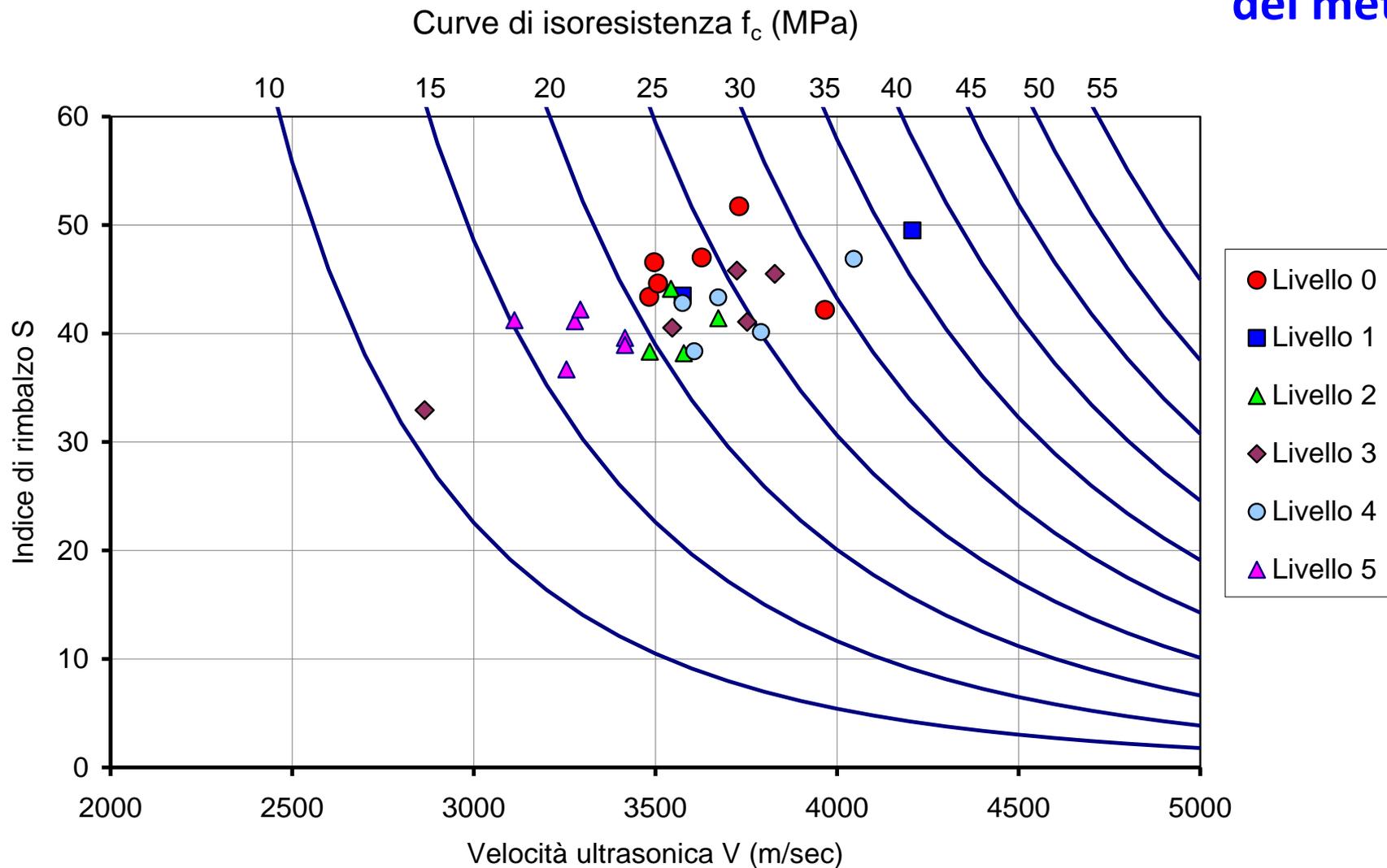
# Il metodo Sonreb

## correlazione delle diverse misure



# Il metodo Sonreb

## Esempio di applicazione del metodo



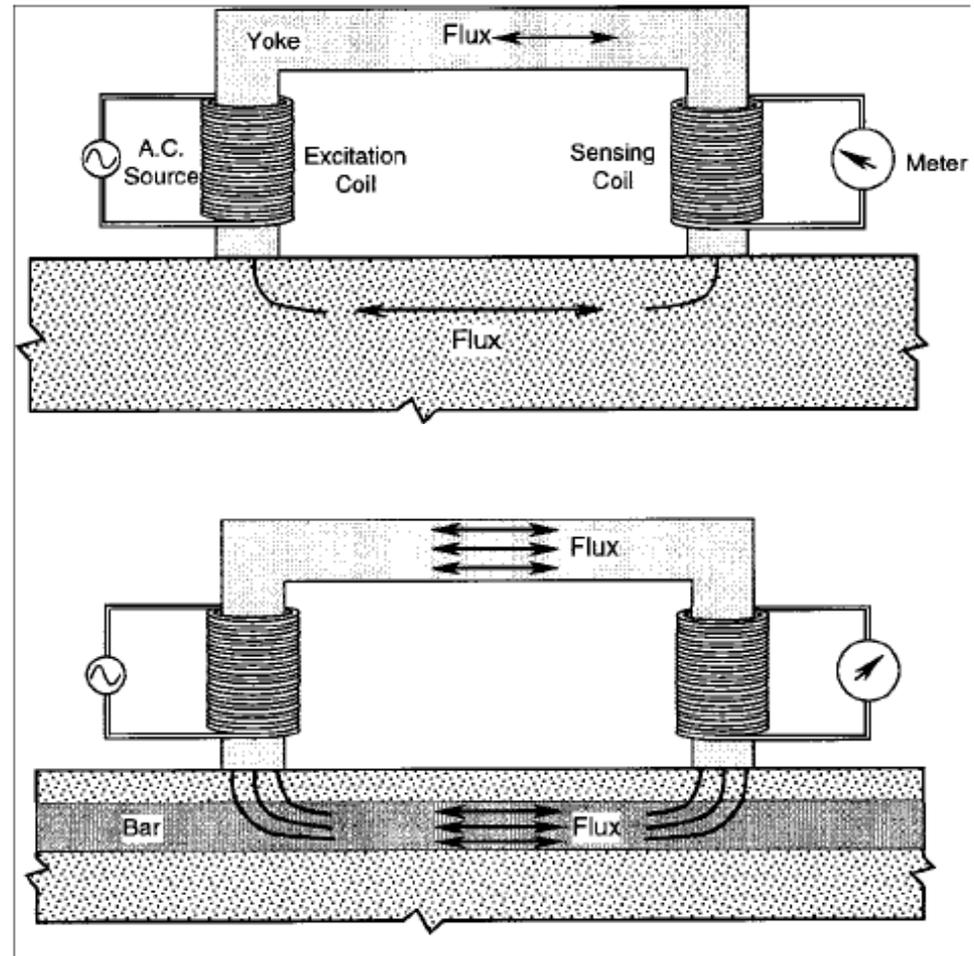
# Individuazione e misura delle armature Metodi delle onde elettromagnetiche

Covermeter basato sul principio della riluttanza magnetica



Corrente debole nella zona sensibile quando non è presente alcuna barra.

La presenza della barra incrementa il flusso ed incrementa la corrente nella zona sensibile.





# Campagna di indagini su un edificio in c.a.

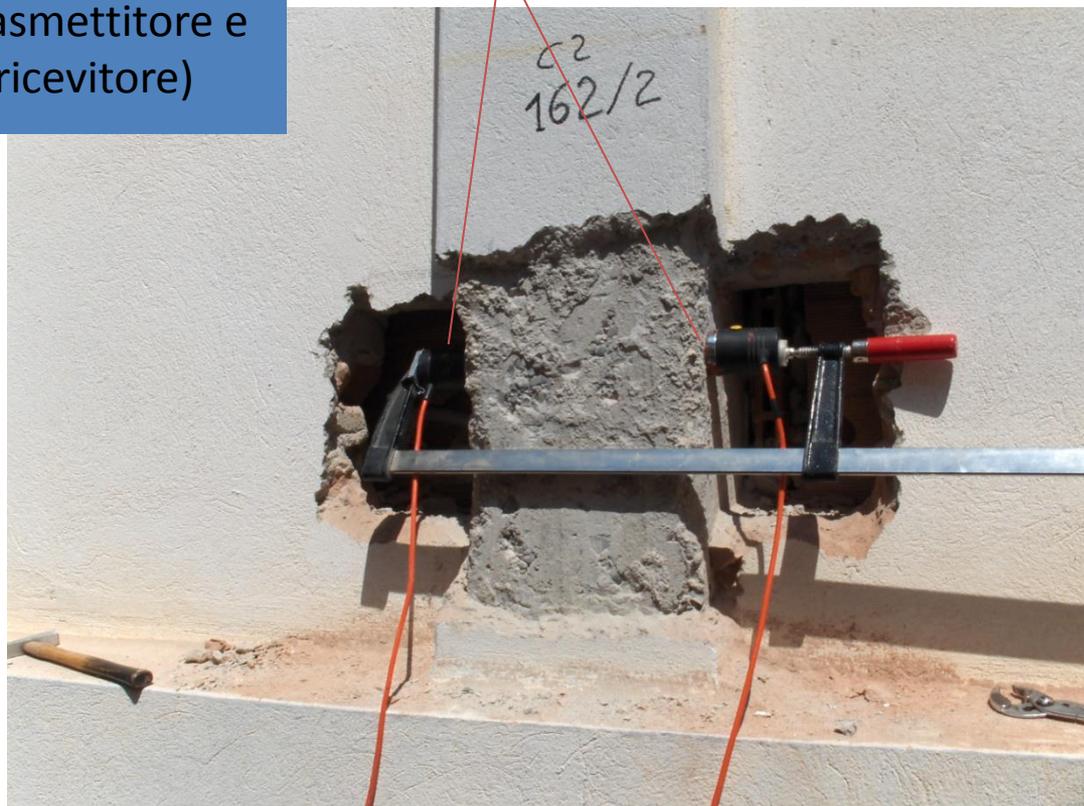
# Strumentazione per prove non distruttive



# Prove ultrasoniche

Sonde  
(trasmettitore e  
ricevitore)

Preparazione dell'elemento da  
indagare



# Saggi: misura dei diametri



# Prove in sito



# Carotaggi



# Carbonatazione del calcestruzzo



# Carbonatazione del calcestruzzo

Il fenomeno della **carbonatazione** è legato al trasporto dell'anidride carbonica dell'atmosfera attraverso i pori del cemento.

La carbonatazione del calcestruzzo e la conseguente **depassivazione delle armature** non provocano **corrosione** se l'acqua e l'ossigeno non sono presenti sulle armature o lo sono in tenori molto bassi.

Le condizioni più critiche di umidità ambientale per l'innesco di fenomeni corrosivi sono principalmente quelle in cui si verificano condizioni di alternanza asciutto bagnato.



# Carbonatazione del calcestruzzo

La **profondità dello strato di calcestruzzo carbonatato** può essere determinata sperimentalmente spruzzando sulla superficie del calcestruzzo una soluzione alcolica di **fenolftaleina**.

Le zone non carbonatate (con pH superiore a 9) assumono la colorazione rosa.

# Prove in sito



Prove sclerometriche

Estrazione di carote



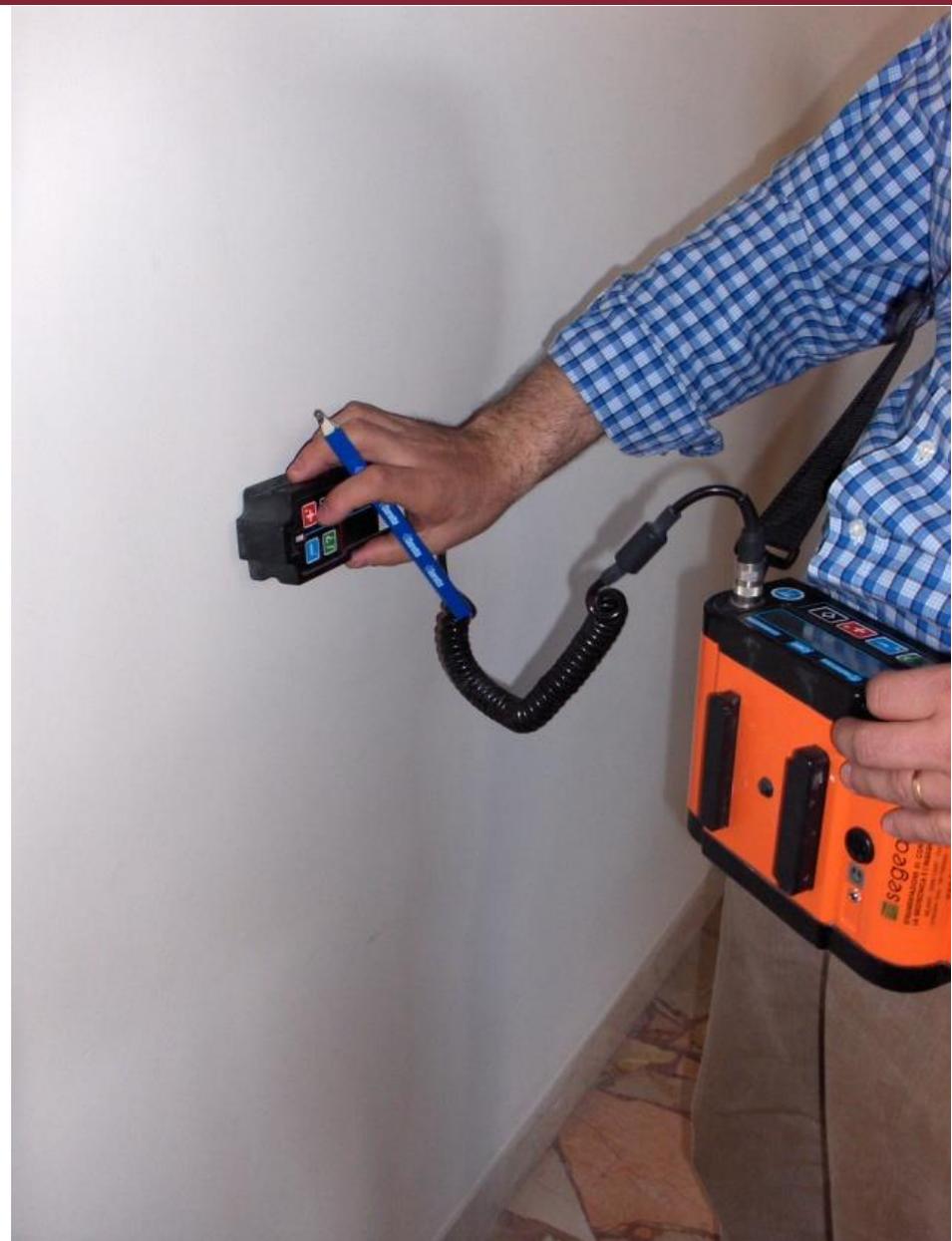


# Carotaggi





# Prova pacometrica



# Estrazione di barre di armatura





# Prove distruttive e non distruttive

## Esempio di elaborazione dei risultati

# Scheda indagini

Scheda tecnica Prove distruttive / non distruttive					N.	38	
Data prova	Corpo	Livello	Elemento strutturale	id.	Lx (cm)	Ly (cm)	
	B	0	Pilastro	10	40	91	
spessore intonaco (mm)					15		

Prova Pacometrica		
STAFFE	passo (cm)	$\phi_{st}$ (mm)
	15	8
BARRE longitudinali		n. barre
		10
Lato lungo	n. barre	
	4	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
35	16	
Lato corto	n. barre	
	3	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
32	16	

Prova Sclerometrica (indice di rimbalzo)			Interasse punti di misura	
			35 mm	
faccia 1	1	2	3	4
A	44	43	42	
B	37	46	46	
C	42	44	56	
D				
faccia 2	1	2	3	4
A	48	38	50	
B	48	48	54	
C	50	46	58	
D				

Prova Ultrasonica		
Velocità (m/sec)		
distanza (m)		0.4
Misura	Velocità (m/sec)	Tempo ( $\mu$ sec)
1	3466.2	115.4
2	3527.3	113.4
3		
4		
5		

Prelievo CAROTA		Id.
Altezza provino		mm
Diametro carota		mm
Spessore carbonatazione		mm
Max dimensione inerte		mm
Peso provino		kg
Peso specifico		kg/mc
Resistenza fc		N/mm <sup>2</sup>

Note:

Scheda tecnica Prove distruttive / non distruttive					N.	1	
Data prova	Corpo	Livello	Elemento strutturale	id.	Lx (cm)	Ly (cm)	
	B	5	Pilastro	26	49.5	40	
spessore intonaco (mm)					5		

Prova Pacometrica		
STAFFE	passo (cm)	$\phi_{st}$ (mm)
	20	8
BARRE longitudinali		n. barre
		6
Lato lungo	n. barre	
	3	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
29	14	
Lato corto	n. barre	
	2	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
27	14	

Prova Sclerometrica (indice di rimbalzo)			Interasse punti di misura	
			35 mm	
faccia 1	1	2	3	4
A	34	34	38	
B	34	38	38	
C	36	39	44	
D				
faccia 2	1	2	3	4
A	37	51	45	
B	35	62	39	
C	38	47	47	
D				

Prova Ultrasonica		
Velocità (m/sec)		
distanza (m)		0.495
Misura	Velocità (m/sec)	Tempo ( $\mu$ sec)
1	3404.4	145.4
2	3428	144.4
3		
4		
5		

Prelievo CAROTA		Id.
Altezza provino		mm
Diametro carota		mm
Spessore carbonatazione		mm
Max dimensione inerte		mm
Peso provino		kg
Peso specifico		kg/mc
Resistenza fc		N/mm <sup>2</sup>

Note: presenza di forati

# Scheda indagini



Scheda tecnica Prove distruttive / non distruttive					N.	3
Data prova	Corpo	Livello	Elemento strutturale	id.	Lx (cm)	Ly (cm)
	A	6	Scale	22		
					spessore intonaco (mm)	

Prova Pacometrica		
STAFFE	passo (cm)	$\phi_{st}$ (mm)
	20	8
BARRE longitudinali		n. barre
		14
Lato lungo	n. barre	
	6	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
28	12	
Lato corto	n. barre	
	3	
coprif. (mm)	$\phi_1$ (mm)	$\phi_2$ (mm)
35	12	

Prova Sclerometrica (indice di rimbalzo)			Interasse punti di misura	
			35	mm
faccia 1	1	2	3	4
A	48	43	46	
B	48	47	46	
C	46	39	42	
D				
faccia 2	1	2	3	4
A				
B				
C				
D				

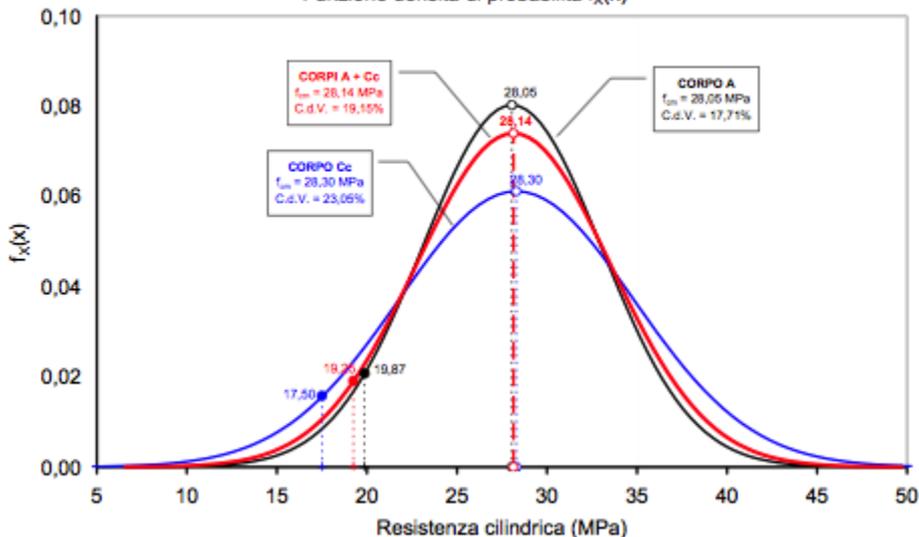
Prova Ultrasonica		
Velocità (m/sec)		
distanza (m)		0.2
Misura	Velocità (m/sec)	Tempo ( $\mu$ sec)
1	3766.8	53.10
2		
3		
4		
5		

Prelievo CAROTA		Id.
Altezza provino	200	mm
Diametro carota	100	mm
Spessore carbonatazione	10	mm
Max dimensione inerte		mm
Peso provino	3.55	kg
Peso specifico	2260	kg/mc
<b>Resistenza compressione <math>f_{car}</math></b>	26.78	N/mm <sup>2</sup>

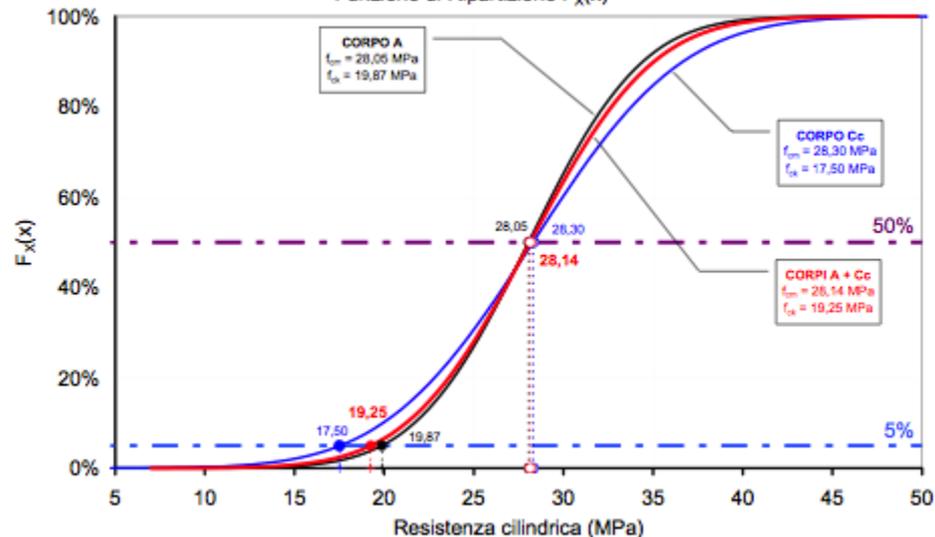
Note:

# Prove di compressione su carote

Funzione densità di probabilità  $f_x(x)$

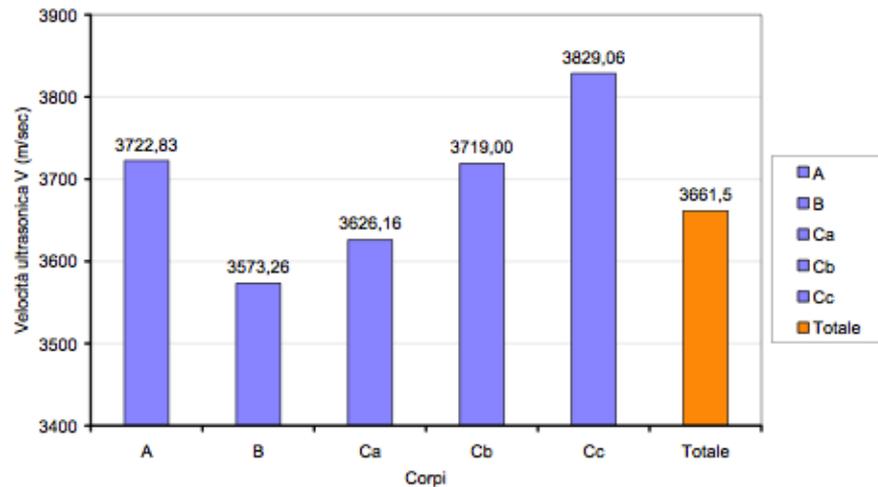


Funzione di Ripartizione  $F_x(x)$

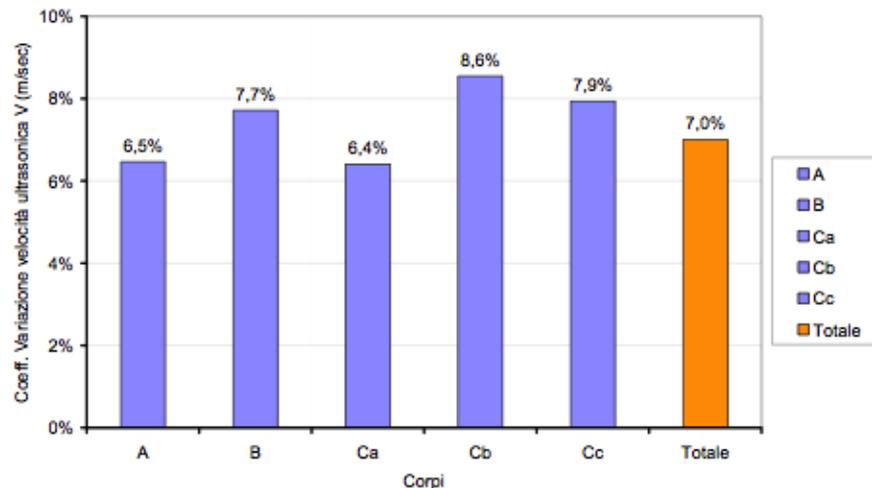


# Prove ultrasoniche e sclerometriche

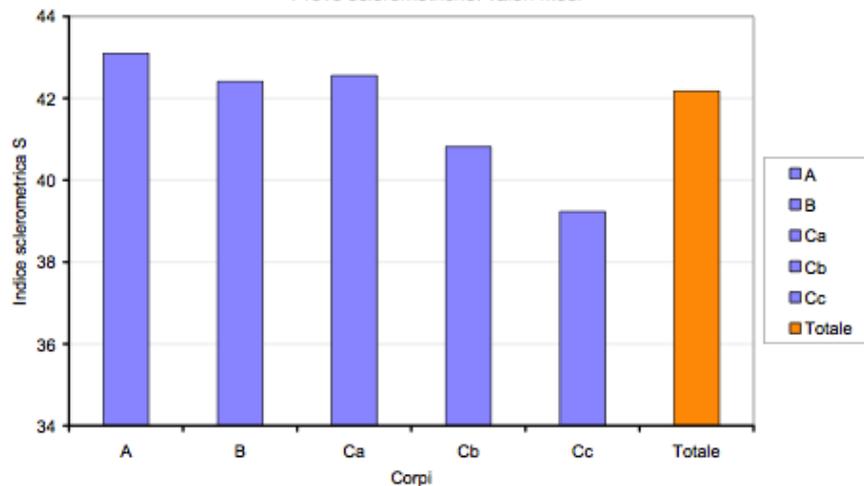
Prove ultrasoniche: valori medi



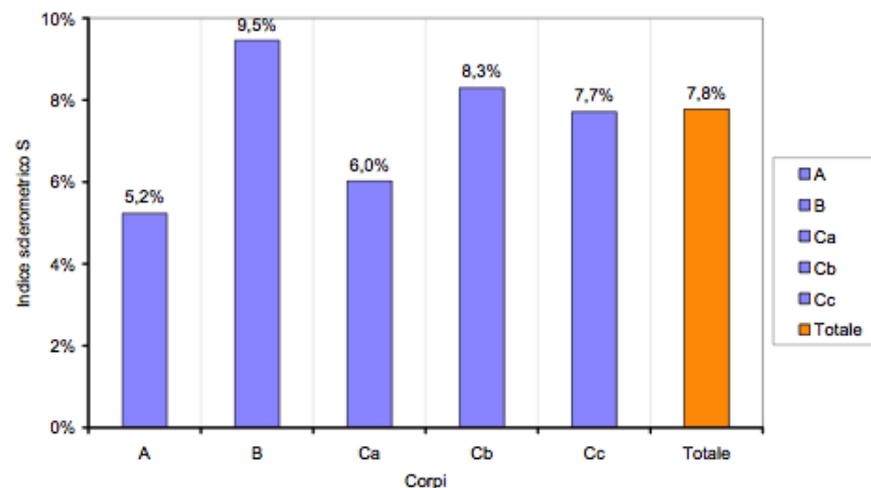
Prove ultrasoniche: coefficienti di variazione



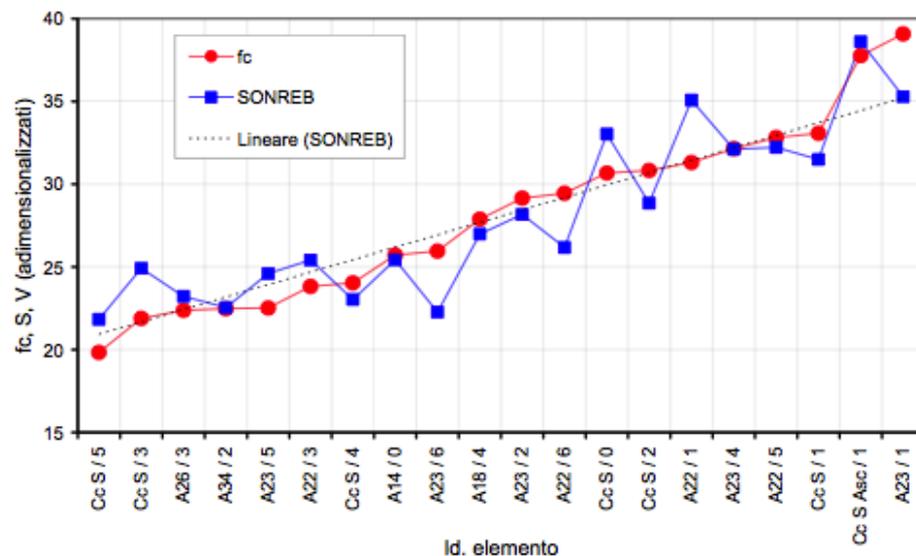
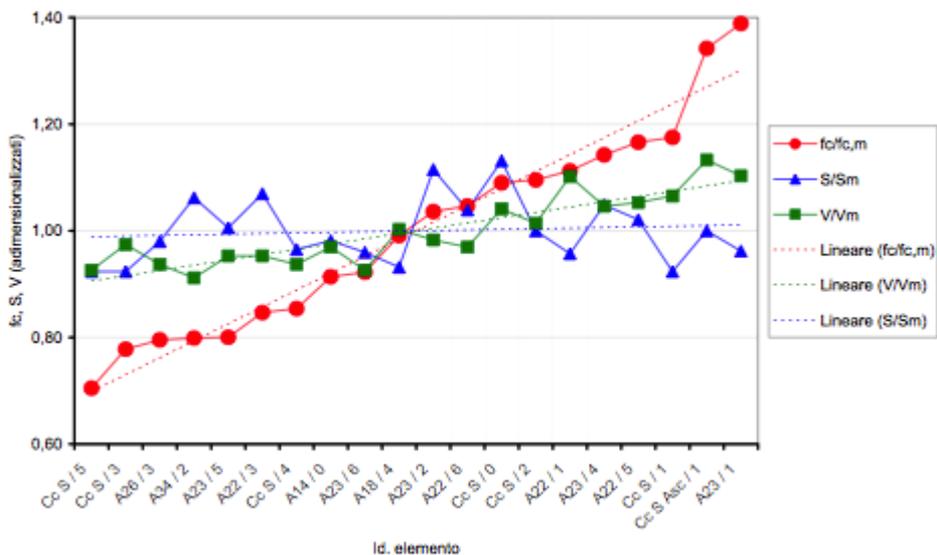
Prove sclerometriche: valori medi



Prove sclerometriche: Coefficienti di variazione

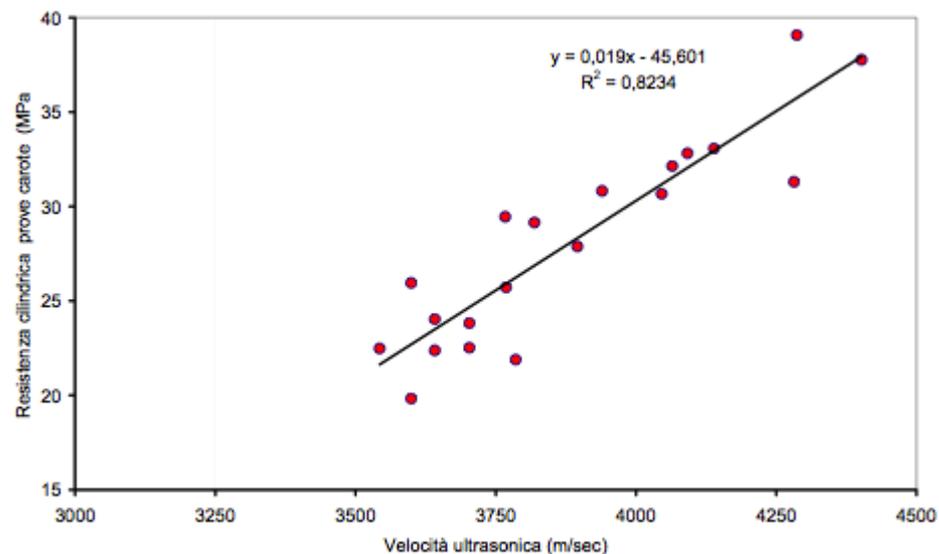
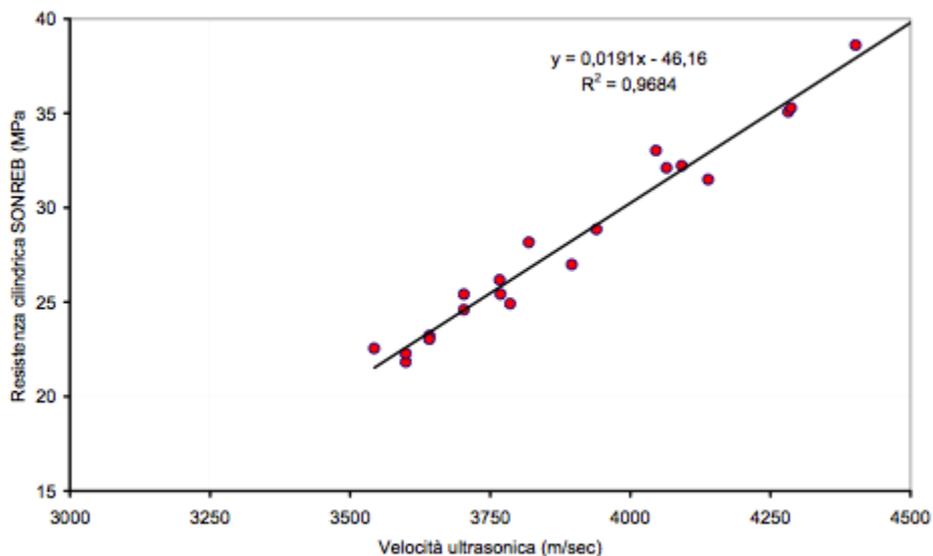


# Applicazione del metodo SONREB

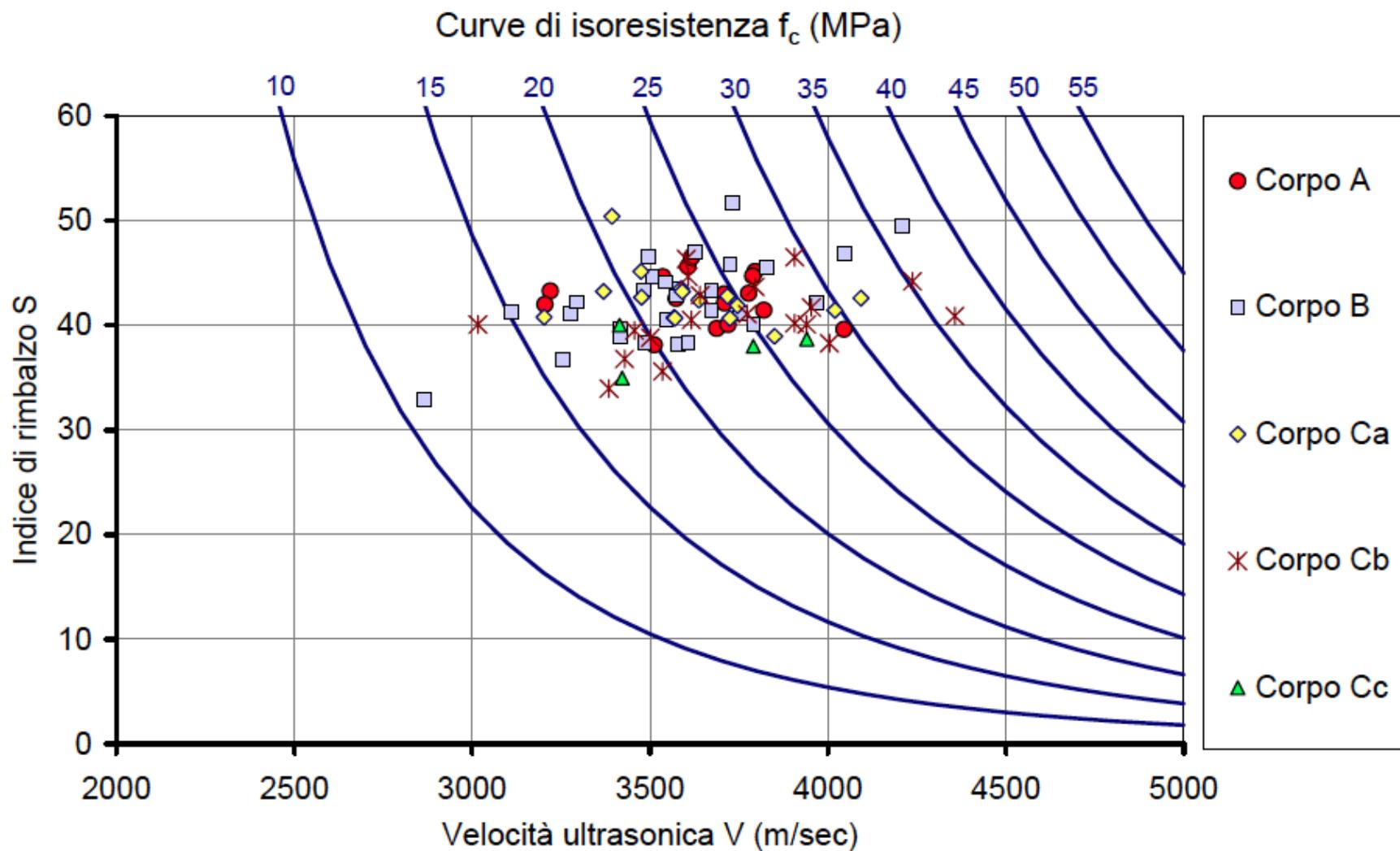


Coefficienti SONREB		
a	b	c
1,453E-09	0,5282	2,6237
$f_c = a \cdot S^b \cdot V^c$		
$f_c =$ resistenza cilindrica (MPa)		S = indice di rimbalzo medio
		V = velocità ultrasonica (m/sec)

# Applicazione del metodo SONREB



# Applicazione del metodo SONREB



# Scheda dati e risultati delle elaborazioni

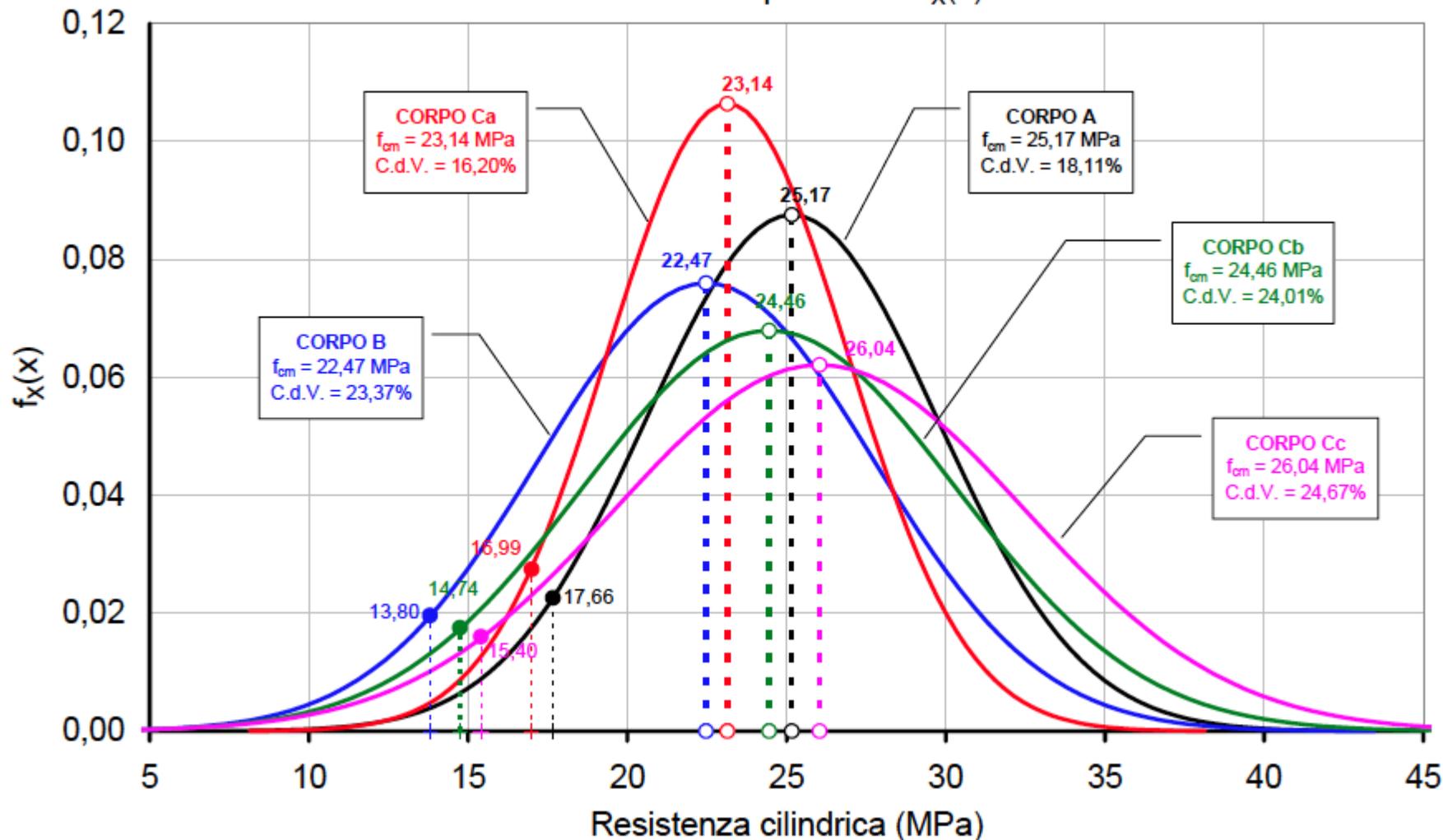
Corpo A				Coefficienti SONREB			$f_c = a \cdot S^b \cdot V^c$				
				a	b	c					
				1,453E-09	0,5282	2,6237					
Prove non distruttive				Prove non distruttive + carote							
Id. elemento	S	V	$f_{c,SONREB}$ N/mm <sup>2</sup>	Id. elemento	$f_{c,car}$ N/mm <sup>2</sup>	S	V	$f_{c,SONREB}$ N/mm <sup>2</sup>			
	-	m/sec			N/mm <sup>2</sup>	-	m/sec				
A17/0	43,3	3219,6	16,99	A26 / 3	22,38	42,4	3641,2	23,22			
A33/0	38,1	3511,9	19,95	A34 / 2	22,48	46,0	3543,0	22,55			
A7/0	45,1	3795,1	26,74	A23 / 5	22,52	43,6	3703,0	24,60			
A25/0	39,6	4045,0	29,50	A22 / 3	23,82	46,3	3703,0	25,42			
A33/1	39,7	3687,5	23,16	A14 / 0	25,71	42,5	3768,4	25,42			
A1/1	43,1	3777,3	25,76	A23 / 6	25,95	41,6	3599,3	22,27			
A24/1	44,7	3788,7	26,48	A18 / 4	27,89	40,4	3895,6	26,99			
A14/1	41,4	3819,8	25,99	A23 / 2	29,15	48,3	3819,0	28,17			
A33/2	42,0	3204,9	16,52	A22 / 6	29,45	45,0	3766,8	26,17			
A25/2	43,0	3707,9	24,52	A22 / 1	31,31	41,4	4281,8	35,08			
A15/2	40,1	3718,9	23,80	A23 / 4	32,14	45,4	4064,7	32,11			
A12/3	42,6	3573,1	22,13	A22 / 5	32,82	44,2	4091,8	32,22			
A20/4	44,6	3535,7	22,08	A23 / 1	39,08	41,7	4286,8	35,28			
A28/4	45,6	3606,9	23,53	Media	28,05	43,75	3858,8	27,65			
A6/4	42,1	3709,6	24,28	Coeff. Variazione	17,7%	5,4%	6,4%	16,5%			
A12/5	46,5	3616,4	23,92								
A28/5	42,8	3623,4	23,03								
A6/5	43,6	3729,1	25,07								
A6/6	42,1	3499,0	20,83								
A20/6	43,4	3519,8	21,50								
Media	42,67	3634,5	23,29								
Coeff. Variazione	5,0%	5,4%	13,6%								
Resistenza cilindrica media calcestruzzo											
Media ( $f_{c,SONREB} + f_{c,car}$ )			<b>25,17</b>								
Coeff. variazione ( $f_{c,SONREB} + f_{c,car}$ )			<b>18,1%</b>								

Curve di iso-resistenza  $f_c$  (MPa)

# Resistenza cls da prove D e ND

Funzione densità di probabilità  $f_X(x)$



# Resistenza cls da prove D e ND

Funzione di Ripartizione  $F_X(x)$

