

Corso di aggiornamento sulla
nuova Normativa Sismica
OPCM 3274/2003 e 3431/2005

Edifici esistenti in cemento armato:
Le indagini e i livelli di conoscenza

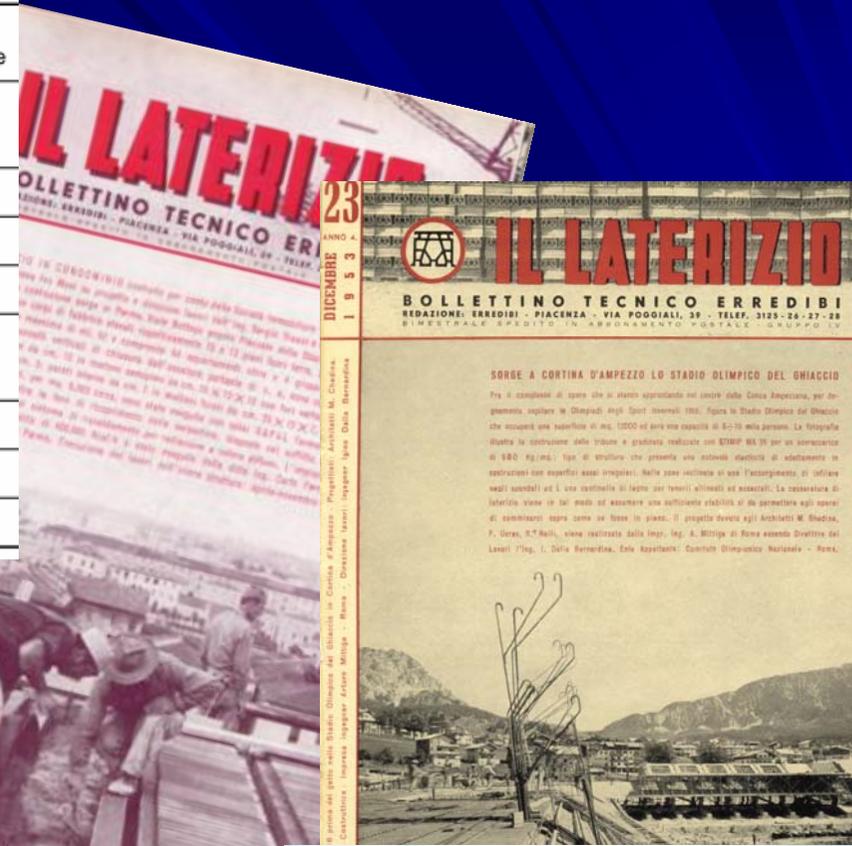
Prof. Ing. Giovanni Fabbrocino

Dipartimento SAVA – Università del Molise



L'edilizia esistente

Tipologia di degrado	Migliaia di alloggi a rischio	val. % sul totale generale
<i>Degrado per vetustà</i>		
Edilizia storica nelle grandi città	105	2,9
Edilizia storica nel resto del territorio nazionale	430	12,1
Edifici con oltre 40 anni di vita	770	21,5
Totale	1.305	36,5
<i>Degrado per ragioni costruttive</i>		
Boom edilizio di fine anni '60	680	19,0
Edifici abusivi multipiano (1)	1.590	44,5
Totale	2.270	63,5
Totale Generale	3.575	100,0



Valutazione ed adeguamento Il processo logico

■ Conoscenza

- ✓ Geometria
- ✓ Caratteristiche dei materiali
- ✓ Condizioni di conservazione

■ Definizione delle prestazioni richieste

- ✓ Sismicità dell'area
- ✓ Destinazione d'uso
- ✓ Livello di protezione richiesto/accettato

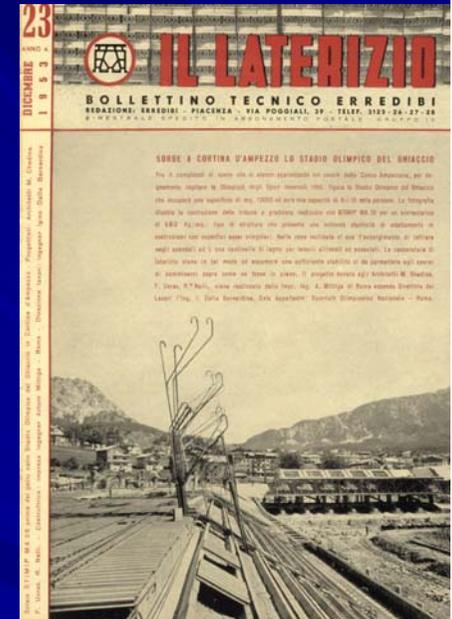
■ Valutazione della struttura esistente

- ✓ Definizione del modello
- ✓ Analisi sismica
- ✓ Verifica di sicurezza

■ Progetto di adeguamento

- ✓ Scelta in relazione a vincoli e prestazioni richieste
- ✓ Dimensionamento dell'intervento

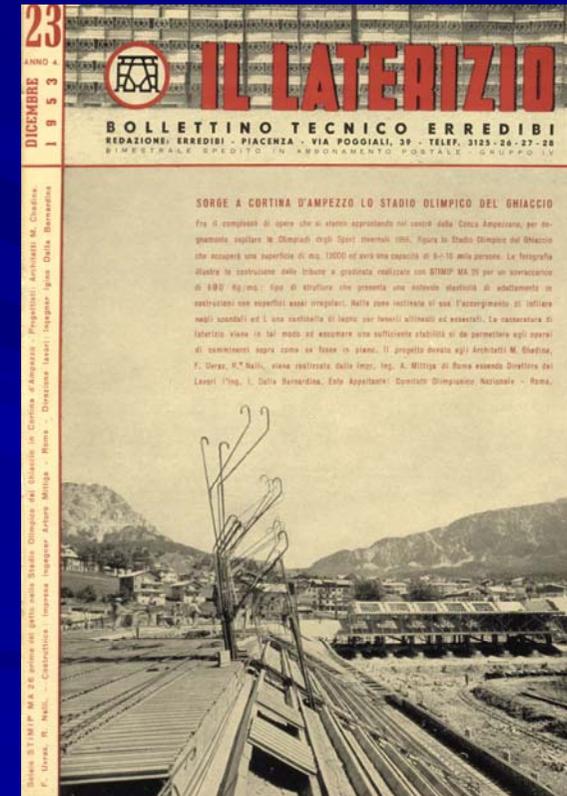
■ Valutazione della struttura adeguata



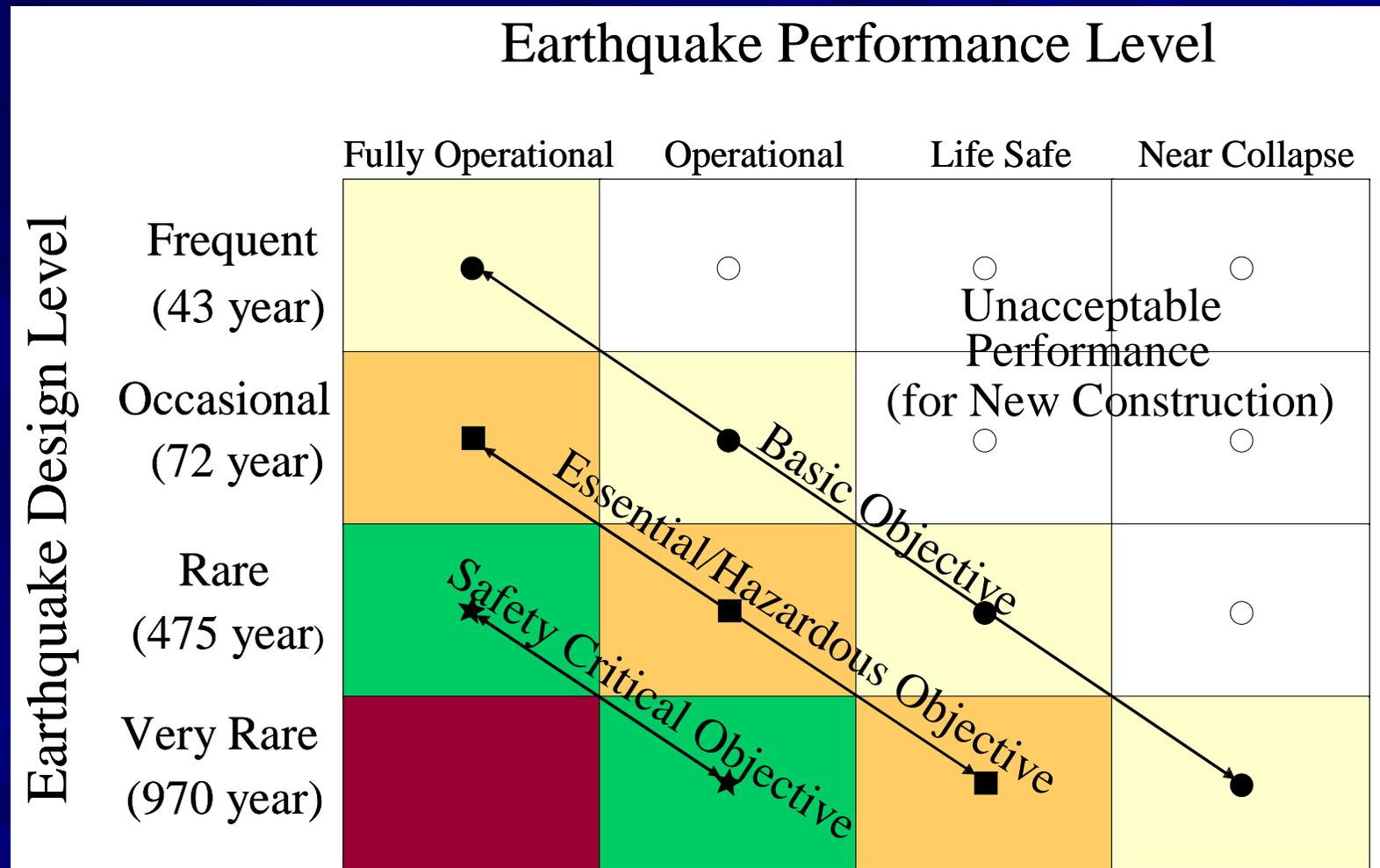
La valutazione della sicurezza

Valutare la sicurezza significa:

- ✓ Procedere quantitativamente a stabilire se un edificio è in grado di resistere alle azioni sismiche di progetto
- ✓ Estendere e impiegare efficacemente i metodi introdotti nel progetto di nuove strutture
- ✓ Tenere in debito conto l'esperienza pregressa sulle prestazioni sismiche di edifici simili realizzati in aree interessate da eventi sismici



La valutazione della sicurezza sismica P.B.D. (performance based design)



Obiettivi prestazionali definiti nelle più recenti norme e linee guida

3. Criteri di verifica

■ Valutazione delle capacità degli elementi strutturali

La valutazione delle capacità è subordinata allo stato limite (SL) richiesto e al tipo di elemento duttile/fragile.

Per il calcolo delle capacità degli **elementi duttili**:

*si utilizzano i **valori medi** delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per il **Fattore di Confidenza** in relazione al livello di conoscenza raggiunto.*

Per il calcolo delle capacità degli **elementi fragili**

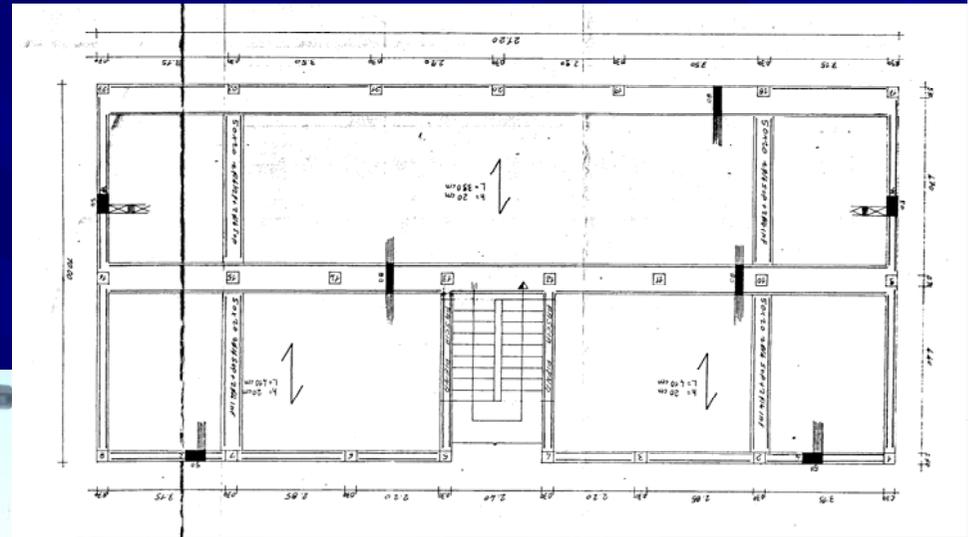
*si utilizzano i **valori medi** delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per il **Fattore di Confidenza** in relazione al livello di conoscenza raggiunto, e divisi per il **coefficiente parziale** relativo.*

4. I dati necessari per la valutazione

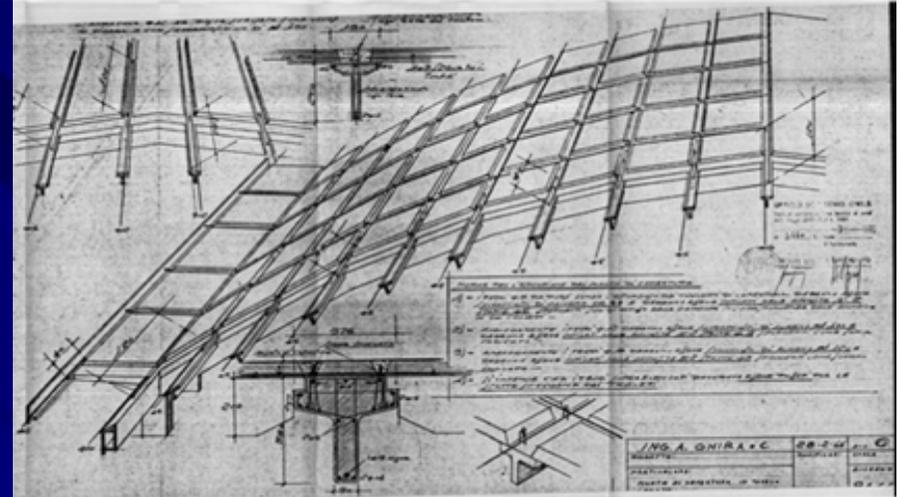
▣ Le fonti di informazione

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

- ✓ Documenti di progetto
- ✓ Rilievo strutturale
- ✓ Prove in situ e in laboratorio



4. I dati necessari per la valutazione



■ Tipologia del dato

- ✓ Definizione dell'organismo e verifica di regolarità
- ✓ Strutture di fondazione
- ✓ Categoria di suolo
- ✓ Geometria e dimensione della struttura portante
- ✓ Caratteristiche meccaniche delle parti strutturali
- ✓ Difetti nei particolari costruttivi e nei materiali
- ✓ Norme vigenti all'epoca del progetto
- ✓ Destinazione d'uso e categoria di importanza
- ✓ Eventuali danni subiti in precedenza e riparazioni effettuate

4. I dati necessari per la valutazione

La quantità e qualità dei dati acquisiti determina:

- ✓ **il metodo di analisi**
- ✓ **i fattori di confidenza** da applicare alle proprietà dei materiali da adoperare nelle verifiche di sicurezza

Ai fini della 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 Adeguata

LC3: Conoscenza Accurata

4. I dati necessari per la valutazione

Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza sono:

Geometria: le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali,

Dettagli strutturali: quantità e disposizione delle armature (c.a.), collegamenti (acciaio), collegamenti tra elementi strutturali diversi, consistenza degli elementi non strutturali collaboranti,

Materiali: proprietà meccaniche dei materiali.

4. I dati necessari per la valutazione

■ LC1: Livello di Conoscenza Limitata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli non sono disponibili da disegni costruttivi e devono venire ricavati sulla base di un **progetto simulato** eseguito secondo la pratica dell'epoca della costruzione.

E' richiesta una *limitata* verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti. I dati raccolti saranno tali da consentire verifiche locali di resistenza.

Proprietà dei materiali: non sono disponibili informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, né da disegni costruttivi né da certificati di prova. Si adotteranno valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca convalidati da *limitate* prove in-situ sugli elementi più importanti.

4. I dati necessari per la valutazione

■ LC2: Livello di Conoscenza Adeguata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti da un'estesa verifica in-situ oppure parzialmente noti dai disegni costruttivi originali incompleti. In quest'ultimo caso è richiesta una *limitata* verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o ai certificati originali di prova, o da *estese* verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite *limitate* prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, dovranno essere eseguite estese prove in-situ.

4. I dati necessari per la valutazione

■ LC3: Livello di Conoscenza Accurata

Geometria: la geometria della struttura è nota o in base a un rilievo o dai disegni originali. In quest'ultimo caso un rilievo visivo a campione dovrà essere effettuato per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni. I dati raccolti sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelli riguardanti i dettagli strutturali, saranno tali da consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo ad un'analisi lineare o non lineare.

Dettagli costruttivi: i dettagli sono noti o da *un'esaustiva* verifica in-situ oppure dai disegni costruttivi originali. In quest'ultimo caso è comunque richiesta una *limitata* verifica in-situ delle armature e dei collegamenti presenti negli elementi più importanti.

Proprietà dei materiali: informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali sono disponibili in base ai disegni costruttivi o ai certificati originali, o da *esaustive* verifiche in-situ. Nel primo caso dovranno anche essere eseguite *estese* prove in-situ; se i valori ottenuti dalle prove in-situ sono minori di quelli disponibili dai disegni o dai certificati originali, dovranno essere eseguite esaustive prove in-situ.

LIVELLI DI CONOSCENZA

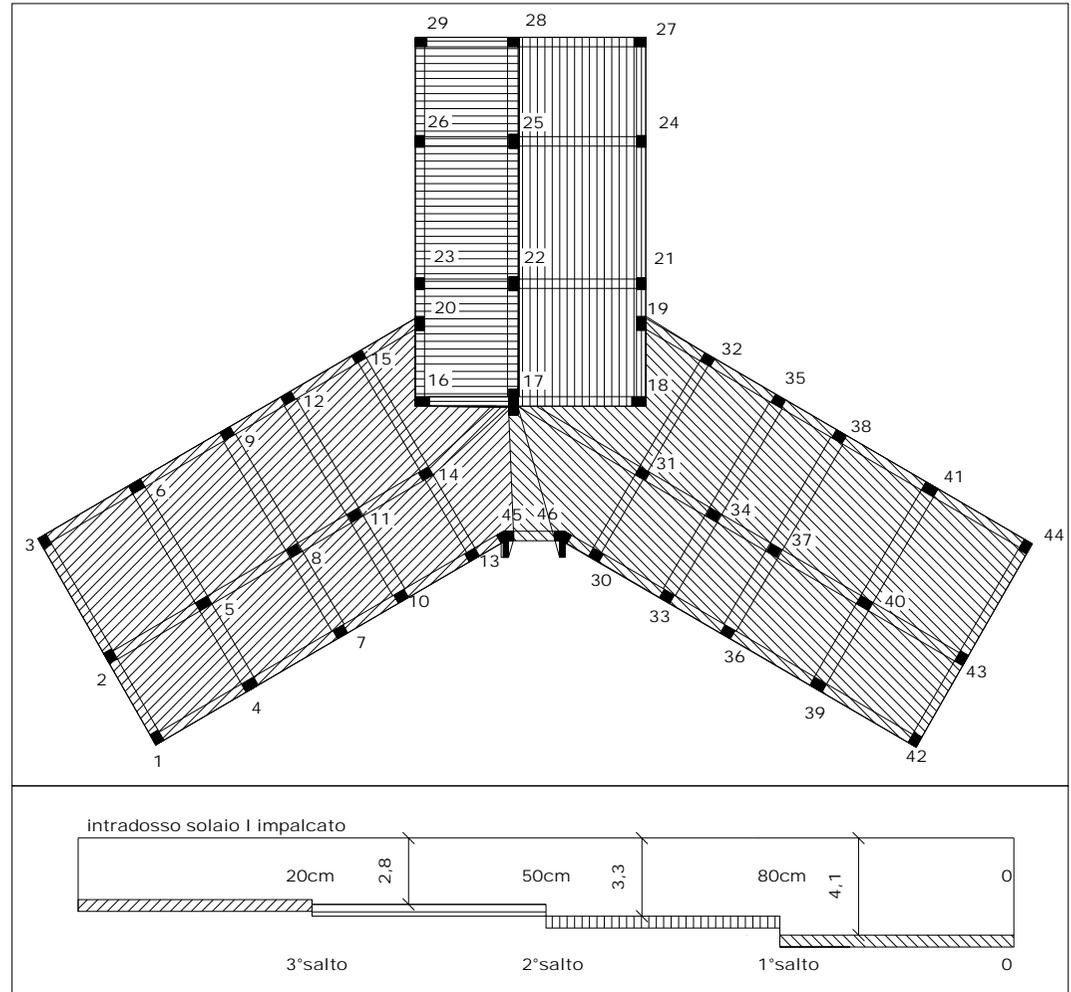
informazione disponibile / metodi di analisi ammessi / fattori di confidenza

Livello di Conoscenza	Geometria (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione oppure rilievo ex-novo completo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>limitate</i> verifiche in-situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>limitate</i> prove in-situ	Analisi lineare statica o dinamica	1.35
LC2		Disegni costruttivi incompleti con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>estese</i> verifiche in-situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali ¹ con <i>limitate</i> prove in-situ oppure <i>estese</i> prove in-situ	Tutti	1.20
LC3		Disegni costruttivi completi con <i>limitate</i> verifiche in situ oppure <i>esaustive</i> verifiche in-situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto con <i>estese</i> prove in situ oppure <i>esaustive</i> prove in-situ	Tutti	1.00

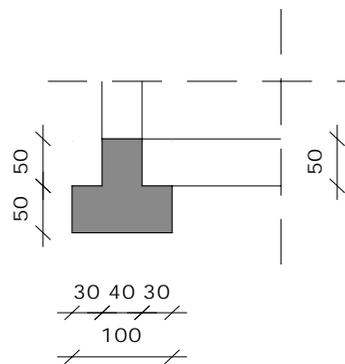
4. I dati necessari per la valutazione

■ Livelli di rilievo/prove per edifici in c.a.

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



TRAVE DI FONDAZIONE



*Il rilievo strutturale
e dei materiali*

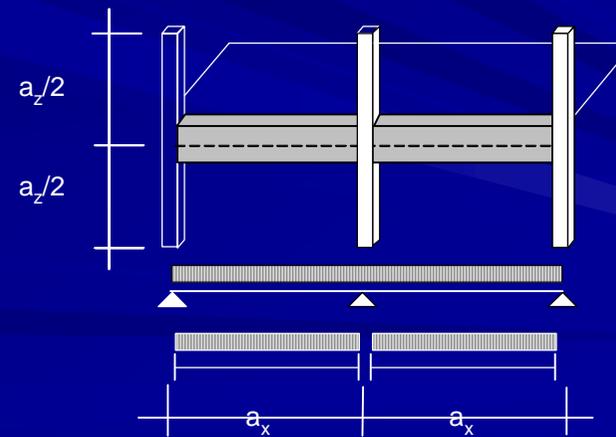
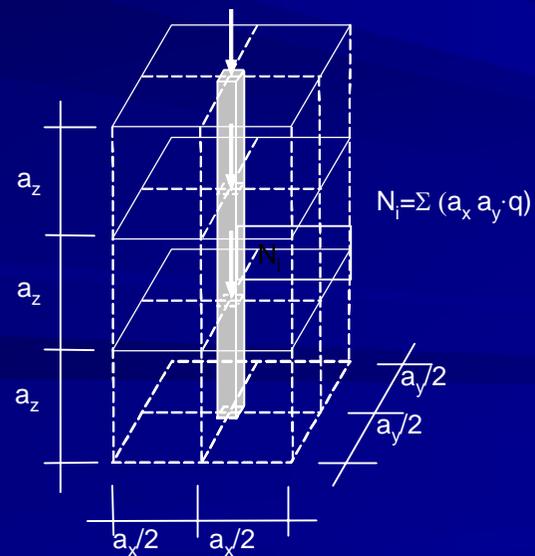
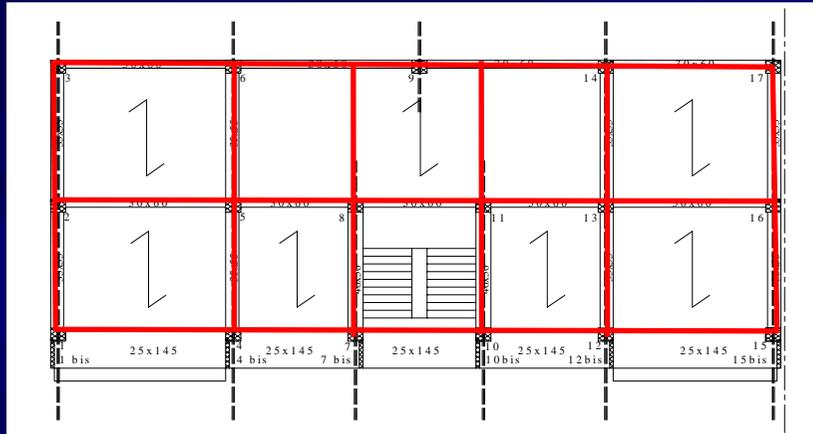
Il rilievo strutturale e dei materiali



- Dimensioni della struttura
- Epoca di costruzione
- Omogeneità dell'impianto strutturale
- Omogeneità dei dettagli costruttivi



Il rilievo strutturale Il progetto simulato



Progetto simulato

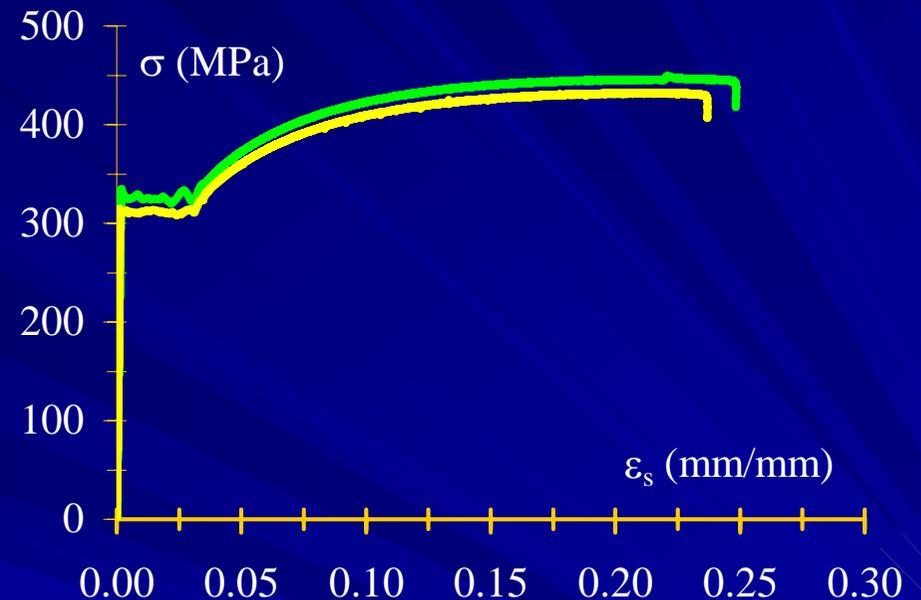
Inquadramento Normativo: Norme tecniche per le opere in c.a.

- **Fino al 1955 si faceva riferimento esclusivamente ai:**
- **RDL del 29/7/1933 n.1213**
- **RD del 16/11/1939 n.2229 rimasto in vigore fino ai primi anni '70**
- **DCPS del 29/12/1947 n.1516**

L'armatura liscia da c.a.

■ R.D.L 16/11/1939
n° 2229

■ Circolare 23/5/1957
n° 1472



	Aq42	Aq50	Aq60
f _u	420-500 MPa	500-600 MPa	600-700 MPa
f _y	≥ 230 MPa	≥ 270 MPa	310 MPa
ε _u	≥ 20%	≥ 16%	≥ 14%

I dettagli di ancoraggio



	σ_{fa} [MPa]	D/ Φ	L/ Φ
Italia	-----	5	3
	140 ÷ 160	5	2.5
Svizzera	200 ÷ 240	8	4
	300 ÷ 340	12	4
Germania	120 ÷ 140	2.5	4
	180 ÷ 240	5	4
Spagna	130 ÷ 180	3	4
Francia	≥ 130	5	2
Gran Bretagna	130 ÷ 210	4	4
U.S.A.	140 ÷ 210	2 ÷ 5	4



Aq42, 40 Φ

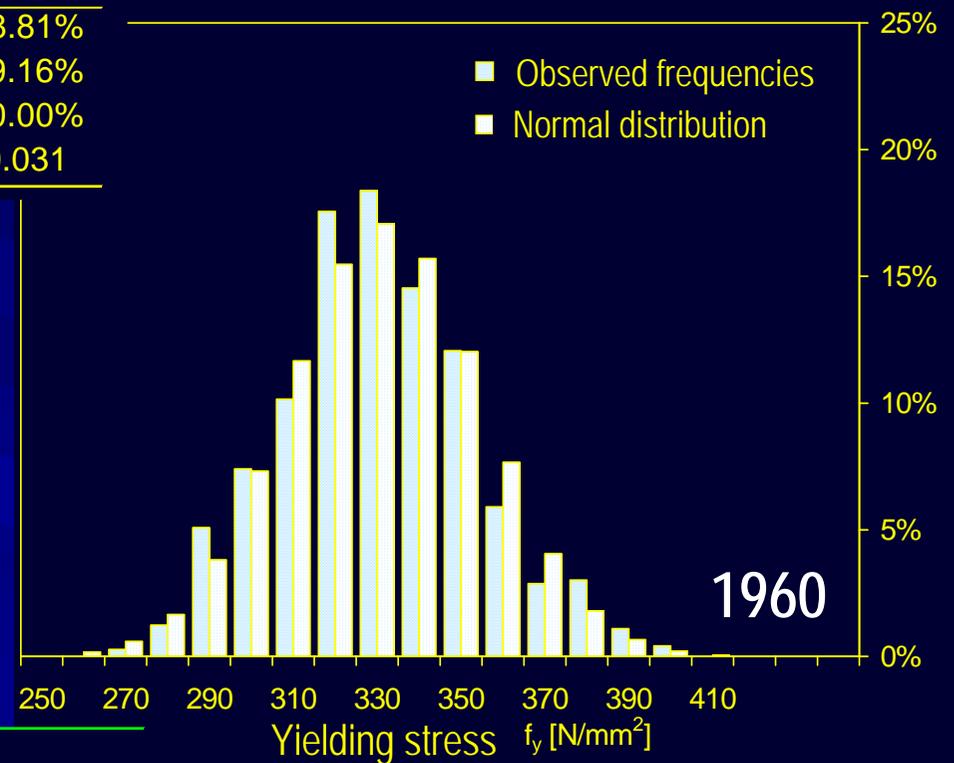
Aq50, 50 Φ

Aq60, 40 Φ

Dati d'archivio per l'acciaio Aq 42

YEAR 1960 DATA

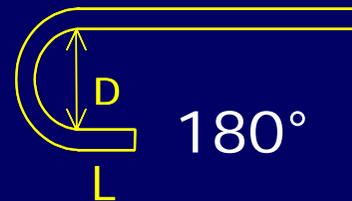
Test numbers 729	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_u/f_y	$A_{10\phi}$
Mean value	325.4	467.1	1.440	28.81%
Maximum value	397.4	499.9	1.812	39.16%
Minimum value	265.0	420.1	1.096	20.00%
Standard deviation	23.165	21.718	0.086	0.031



1961-1970 DECA DE DATA

Test number: 232	f_y [MPa]	f_u [MPa]	f_u/f_y	$A_{10\phi}$
Mean value	328.6	470.0	1.436	29.07%
Maximum value	408.0	499.8	1.696	35.62%
Minimum value	260.0	422.0	1.158	20.00%
Standard Deviation	26.100	18.800	0.088	0.032

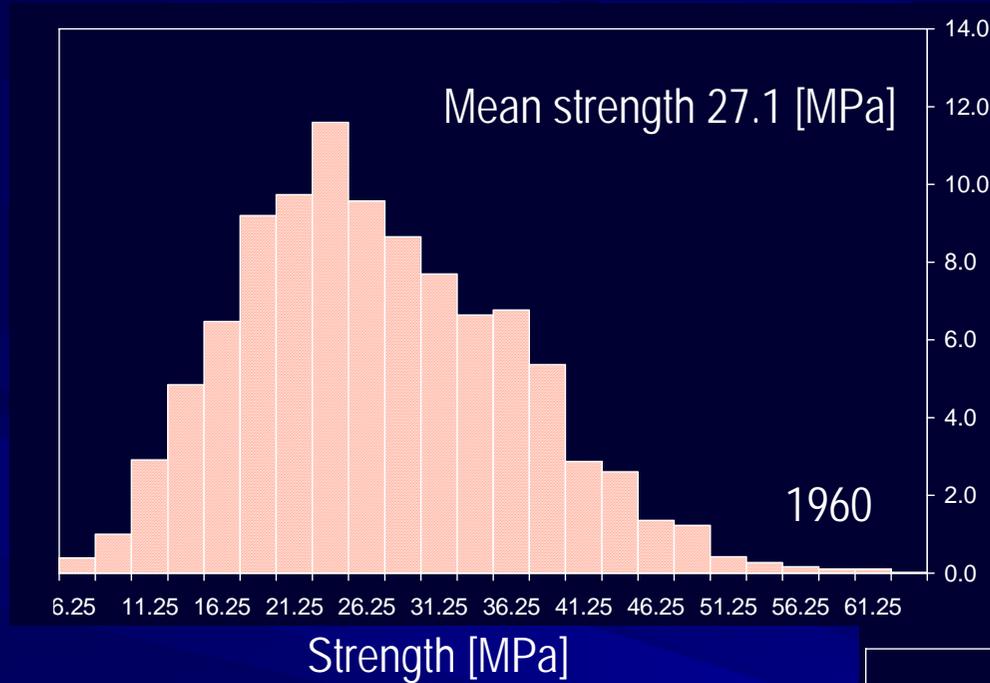
Typical anchoring devices



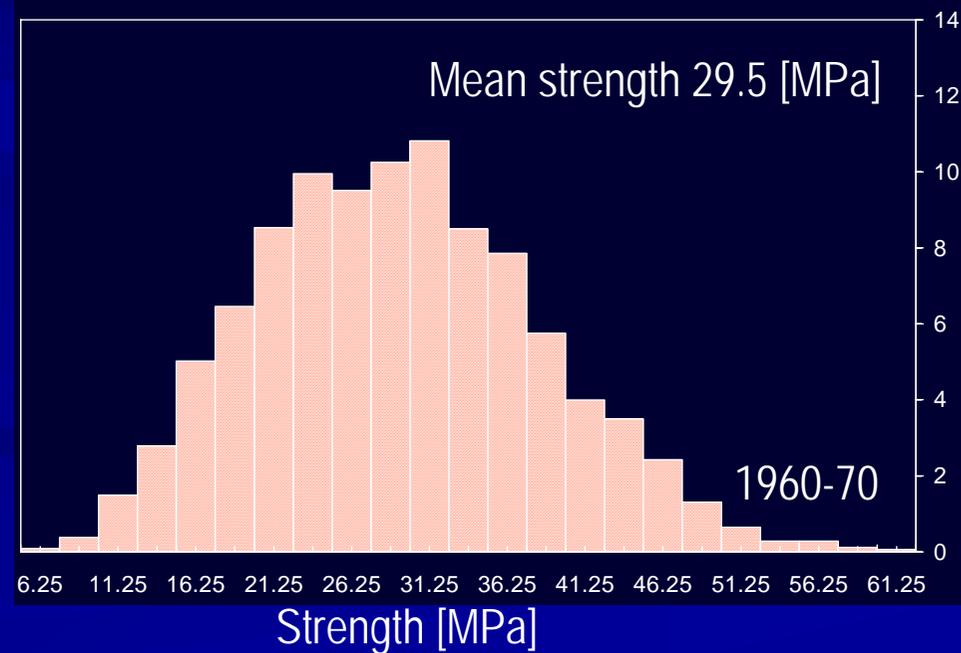
- Poor bond performance
- Anchoring end details
 - hooks at rebar ends
 - hooks and transverse rebar
 - welded transverse rebar

		σ_{fa} [MPa]	D/ Φ	L/ Φ
a)	Austria Önorm B4200, 1957	100 ÷ 140	2.5	4
		180 ÷ 246	5	4
b)	Belgium NBN 15, 1955	120 ÷ 210	2 ÷ 4	≥ 3
c)	Switzerland SIA Normen # 162, 1956	140 ÷ 160	5	2.5
		200 ÷ 240	8	4
d)	Germany DIN 1045, 1952	120 ÷ 140	2.5	4
		180 ÷ 240	5	4
e)	Denmark DS 411, 1949	≥ 130	5	6
f)	Spain Instr. obras de hormigon, 1951	130 ÷ 180	3	4
g)	France Regles B.A. 1945	≥ 130	5	2
h)	UK British standard CP 114	130 ÷ 210	4	4
i)	The Netherlands GBV 1950	130 ÷ 240	5	4
l)	U.S.A. ACI 318-51	140 ÷ 210	2 ÷ 5	4
m)	Italy RDL 1939	140 ÷ 220	3	5

Dati d'archivio per il calcestruzzo



- Cemento titolo: 600-670-730
- Cemento: 3 kN/mc
- Resistenza cubica a 28 gg.

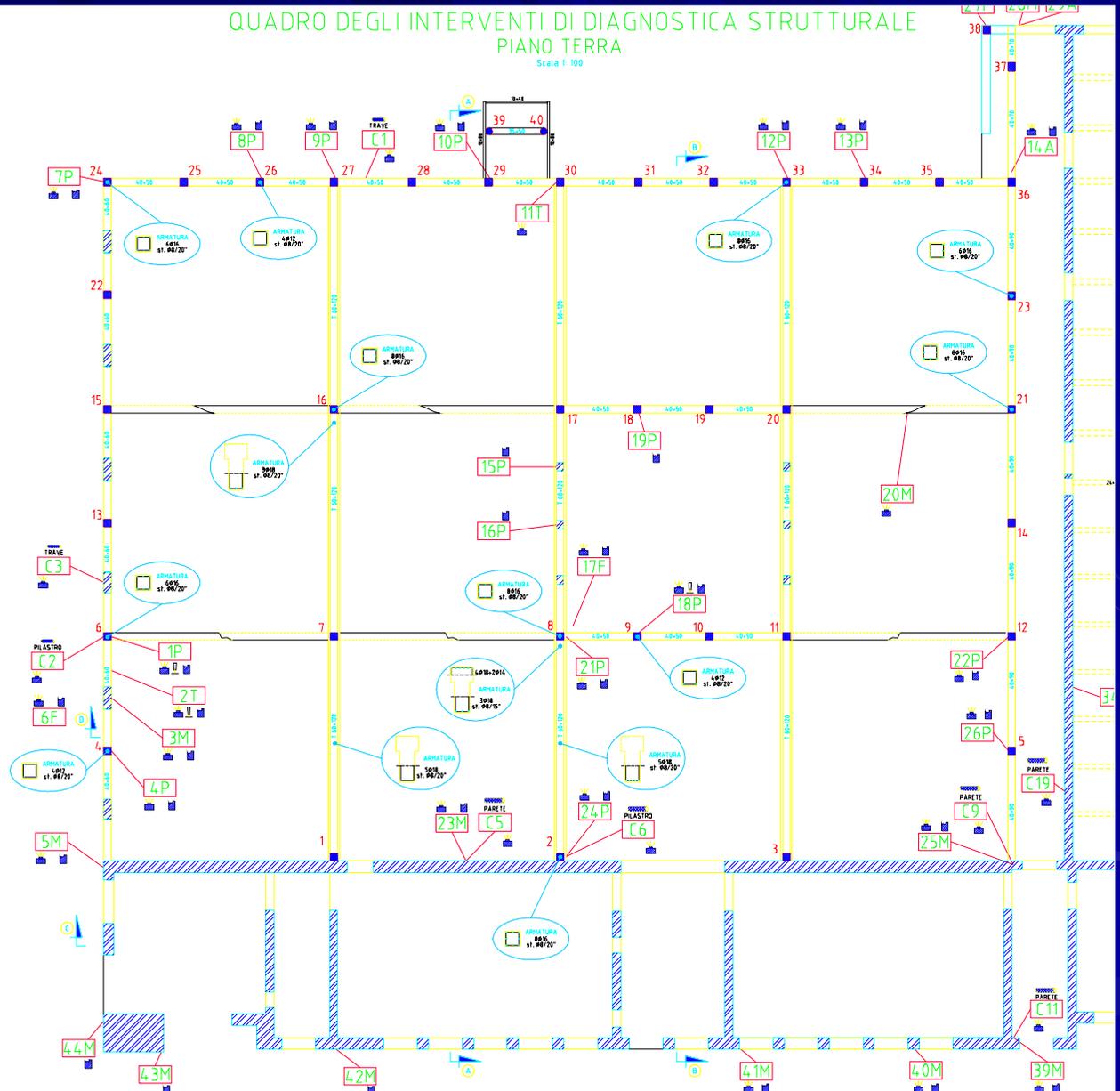


Il rilievo strutturale e dei materiali

QUADRO DEGLI INTERVENTI DI DIAGNOSTICA STRUTTURALE
PIANO TERRA
Scala 1:100

LEGENDA

13x	NUMERO DEL PUNTO DI INDAGINE
xxP	INDAGINE SU PILASTRO
xxT	INDAGINE SU TRAVE
xxF	INDAGINE SU FONDAZIONE
xxM	INDAGINE SU MURATURA
xxS	INDAGINE SU SOLAIO
xxA	INDAGINE SU ARCHITRAVE (PIATTABANDA, CORDOLO O SIMILI)
Cxx	CAROTTAGGIO DELL'ELEMENTO
	FOTOGRAFIE
	PROVA SCLEROMETRICA
	SONDAGGIO PER DEFINIZIONE TIPOLOGIA E GEOMETRIA ELEMENTI
	ESTRAZIONE DI CAROTA DALL'ELEMENTO
	ELEMENTO IN CALCESTRUZZO ARMATO
	ELEMENTO IN MURATURA DI TUFO O MATTONI PIENI



Tipologie di prove per strutture in c.a.

Informazione richiesta	Tipologie di prova disponibili
Comportamento statico e resistenza elementi strutturali inflessi (solai e travi)	<ul style="list-style-type: none">■ Prove di carico con misura delle deformazioni
Resistenza del calcestruzzo	<ul style="list-style-type: none">■ Carotaggi e microcarotaggi con prove di rottura a compressione■ Metodi ultrasonici■ Metodo sclerometrico e SonReb■ Prove di pull-out
Degrado calcestruzzo	<ul style="list-style-type: none">■ Prove per la determinazione della profondità di carbonatazione■ Analisi chimiche

Tipologie di prove per strutture in c.a.

$R_{c, str}$



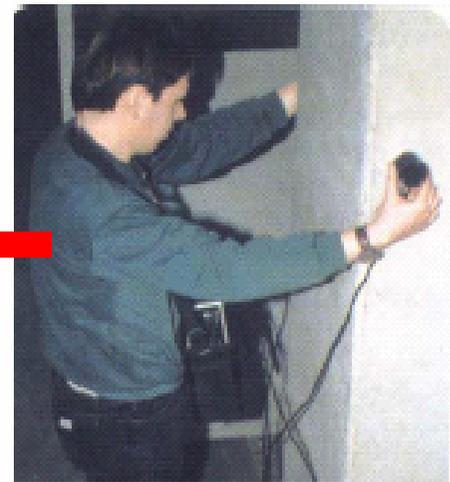
$R_{c, cub}$



$R_{c, car}$



$R_{c, PND}$



Edifici Nuovi

Edifici Esistenti

Tipologie di prove per strutture in c.a.

Informazione richiesta	Tipologia di prova disponibili
Resistenza dell'acciaio per armature	■ Prelievo campioni di armatura con prova di rottura a trazione
Individuazione delle armature	■ Saggi diretti ■ Rilievi pacometrici
Degrado acciaio per armature	■ Prove di avanzamento della corrosione nelle barre
Dimensioni e profondità fondazioni	■ Saggi diretti (scavi) ■ Rilievi Georadar

Interpretazione dei risultati delle prove su materiali e strutture

Carotaggi e microcarotaggi:

- Estrazione in situ di carote $\phi 100$ (o microcarote $\phi 60$) da elementi in calcestruzzo
- Prove di rottura a compressione (in laboratorio)
- Correlazione tra la resistenza misurata sulla carota e la resistenza cubica a compressione (British Standard):

$$R_{cub} = R_{carota} \cdot \frac{2.5}{1.5 + \phi / h}$$

per prelievo orizzontale, con ϕ ed h diametro ed altezza della carota (in genere $\phi/h = 0.5$).

- **N.B.:** E' una prova "distruttiva": occorre stabilire con oculatezza il numero e la localizzazione dei prelievi.

Interpretazione dei risultati delle prove su materiali e strutture

Carotaggi e microcarotaggi:



- Forma del provino;
- Snellezza del provino(h/d);
- Disturbo arrecato dal carotaggio;
- Direzione di campionamento;

→ R_c

British Standard
1881 (1983)

$$R_c = k_1 \frac{F_{car}}{1.5+d/h}$$

Guida A.C.I.
214.4R-03 (2003)

$$f_c = F_{l/d} F_{dia} F_{mc} F_d f_{core}$$

- CIs in situ con differenza di maturazione da punto a punto;
- CIs in situ con differenza di costipamento;

Prove non distruttive



- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- PULL-OUT
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR

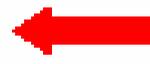
Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

$R_{c, str}$



$R_{c, cub}$



$R_{c, car}$



$R_{c, PND}$

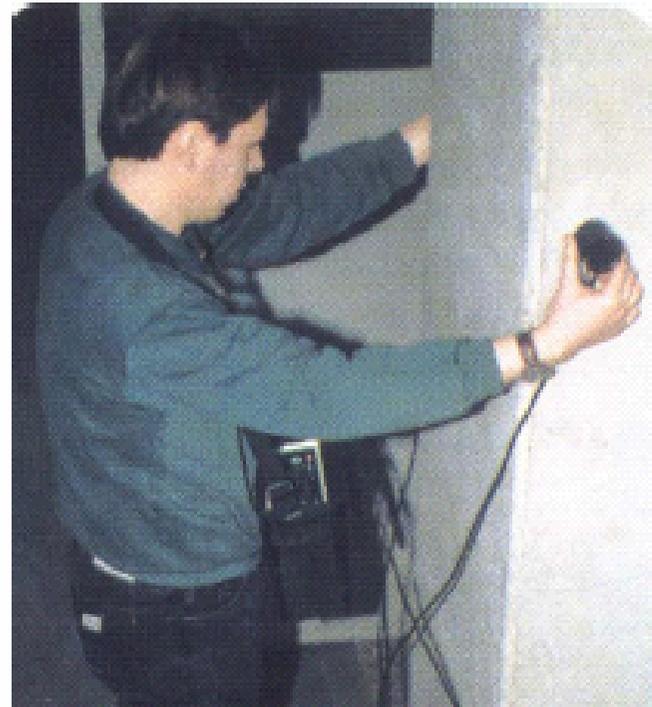
- INDAGINI ULTRASONICHE

- INDAGINI SCLEROMETRICHE

- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)

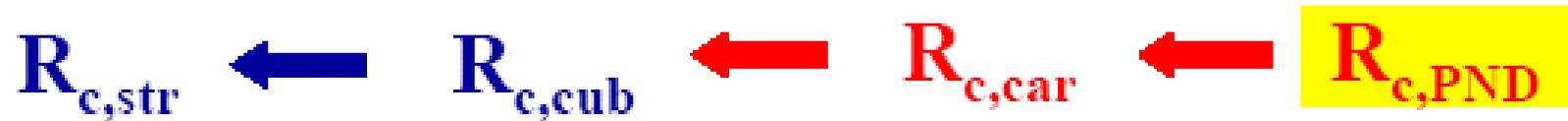
- PULL-OUT

- METODO PENETROMETRICO WINDSOR

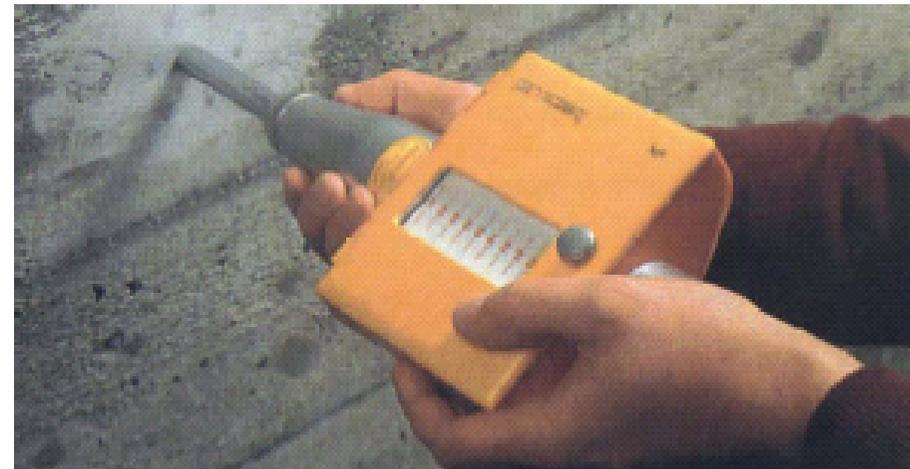


Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto



- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- PULL-OUT
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR

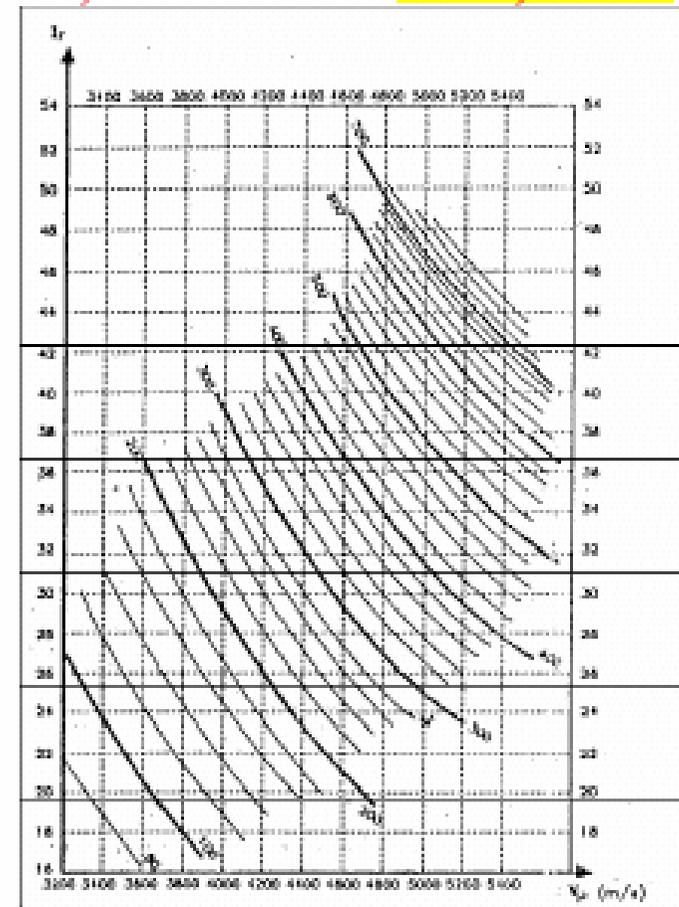


Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

$R_{c, str}$ ← $R_{c, cub}$ ← $R_{c, car}$ ← $R_{c, PND}$

- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- PULL-OUT
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

$R_{c, str}$



$R_{c, cub}$

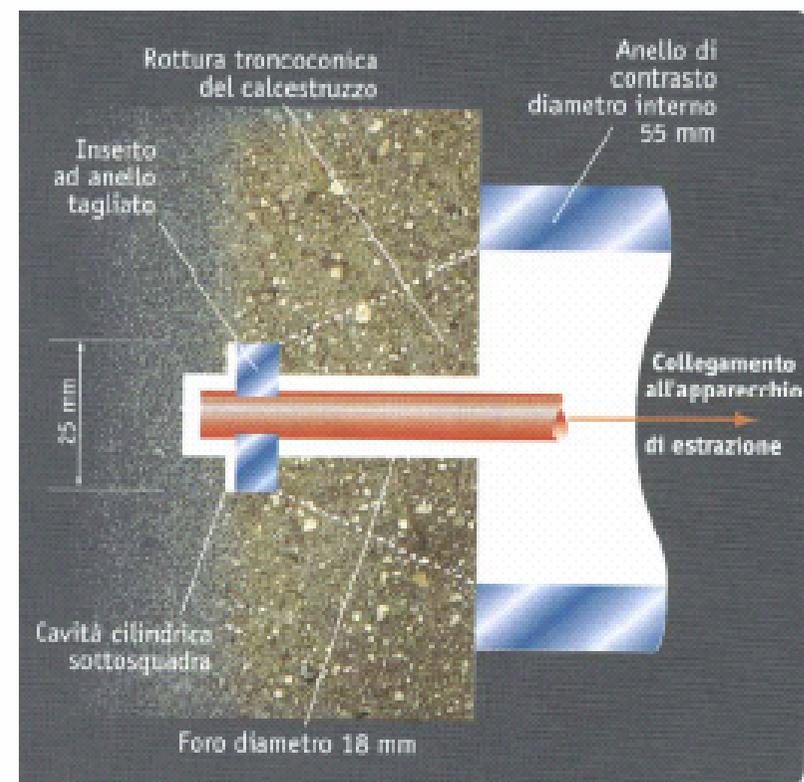


$R_{c, car}$



$R_{c, PND}$

- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- **PULL-OUT**
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto



- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- PULL-OUT
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

$R_{c, \text{str}}$



$R_{c, \text{cub}}$

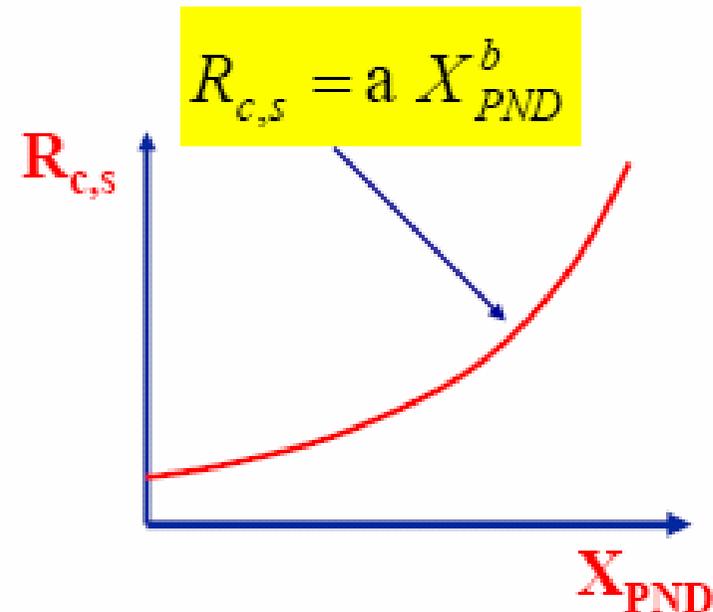


$R_{c, \text{car}}$



$R_{c, \text{PND}}$

- INDAGINI ULTRASONICHE
- INDAGINI SCLEROMETRICHE
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB)
- PULL-OUT
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

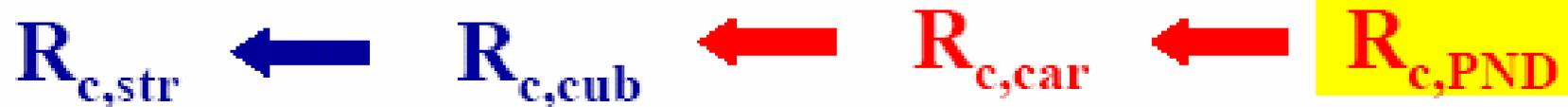


- INDAGINI ULTRASONICHE \leftarrow Norma Belga NBN B15-229 (1976)
- INDAGINI SCLEROMETRICHE \leftarrow Bocca-Focaoaru (1982)
- INDAGINI COMBinate ULTRASONICHE E SCLEROMETRICHE (SONREB) \leftarrow Cianfrone-Focaoaru (1979)
- PULL-OUT \leftarrow Petersen (1983)
- METODO PENETROMETRICO WINDSOR \leftarrow ASTM C803

$$R_{c,s} = a X_{PNL}^b$$
$$R_{c,s} = \prod C_j (a X_{PNL}^b)$$

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto



Tipo di cemento	C_1	Natura aggregato	C_2	Diametro max	C_3
425 Pt	1	Calcereo	1	7	1.09
325 Pt	0.94	Serpentino	1.35	15	1.03
		Diaspro	1.38	30	1.00
				70	0.96

Dosaggio Kg/mc	C_1	Frazione fine 0-1	C_4	Additivo	Dosaggio	C_4
200	0.76	8%	0.91	Uraplast	<0.25%	1.00
250	0.82	14%	0.94	Espansol	<1.5%	1.00
300	0.88	20%	0.97	Plastiment	<0.25%	1.00
350	0.94	26%	1.00	Pozzolith	0.25%	1.06
400	1.00	32%	1.03	Fluidal	0.2%	1.08
450	1.06	38%	1.05			
500	1.12	44%	1.07			
600	1.24					

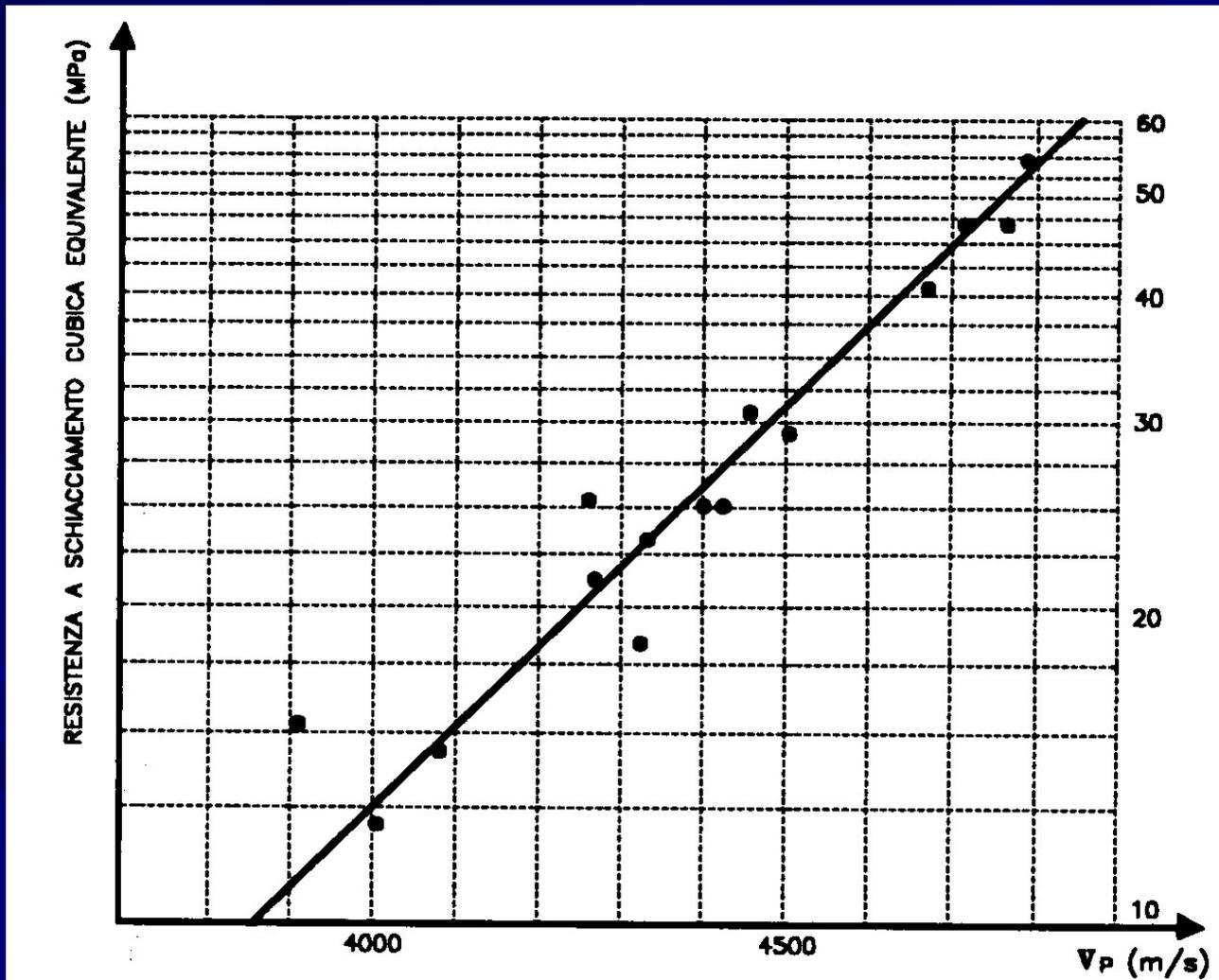
$$R_{c,s} = a X_{PND}^b$$

$$R_{c,s} = \prod C_j (a X_{PND}^b)$$

Prove su materiali e strutture

Prove ultrasoniche sul calcestruzzo:

- Procedimento di misura indiretta della resistenza a compressione mediante **correlazione con i risultati dei carotaggi**:



- misura della velocità di propagazione delle onde nei siti sede di carotaggio (e/o misura sulle carote estratte);
- costruzione della curva di correlazione velocità-resistenza;

- l'analisi viene completata con la misura della velocità di propagazione in altre parti della struttura, ottenendosi una informazione indiretta sui valori e sulla omogeneità della distribuzione delle resistenze del calcestruzzo nella struttura.
- **Determinazione del modulo elastico a partire dalla velocità:**

$$E_{c,din} = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \cong 2.133 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

$$E_{c,stat} = 0.80 \cdot E_{c,din}$$

(v in m/s)

- **Tabella con valori indicativi di correlazione velocità-resistenza:**

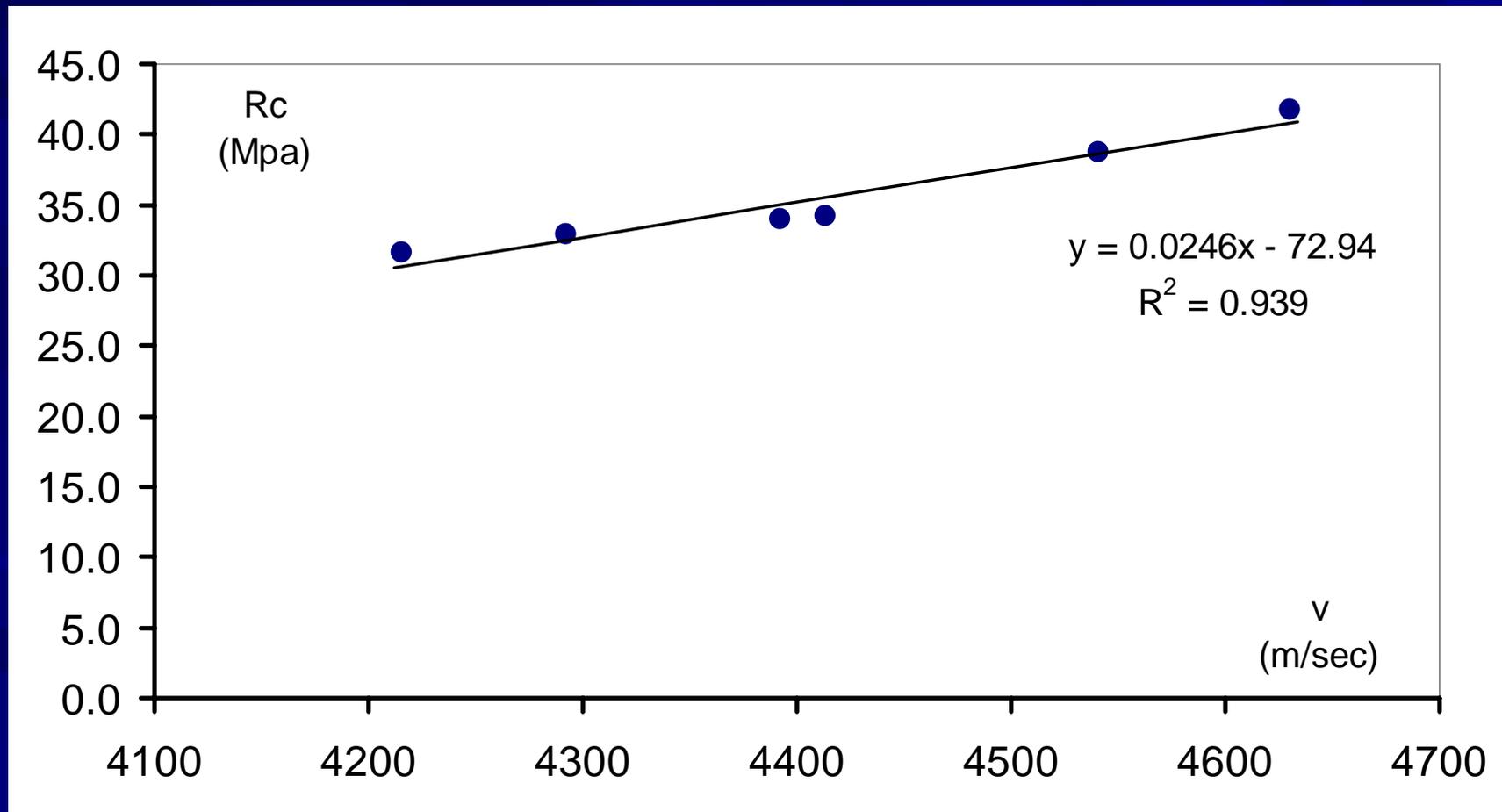
TABELLA 6
Esempio di correlazione Vp - qualità del calcestruzzo (Rc) secondo SAWCZUK [28]

Qualità	Vp (km/s)	Rc (MPa)
Eccellente	4.0÷4.5	circa 40
Buona	3.5÷4.0	circa 25
Discutibile	3.0÷3.5	circa 10
Scadente	2.0÷3.0	circa 4
Molto scadente	< 2.0	-----

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa a)



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa a)

correlazione diretta con carote

Alternativa b)

**impiego di una correlazione disponibile
e sua calibrazione con i risultati ottenuti dalle carote**

European standard prEN 13791

(Assessment of concrete compressive strength in structures or in structural elements)

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa a)

Prove su carote

	Iden.	Piano	Pos.	El.	Diam.	H	Peso	Area	fc	Rc
					mm	mm	Kgf	mmq	N/mmq	N/mmq
1	C-1/1	Liv.-1	Pil.7	Pilastro	94	188	3.105	6940	27.33	34.2
2	C-1/2	Liv. -1	Pil.10	Pilastro	94	188	2.920	6940	25.26	31.6
3	C-1/3	Liv. -1	Pil.15	Pilastro	94	188	3.080	6940	26.3	32.9
4	C-1/4	Liv. -1	Pil.20	Pilastro	94	188	3.067	6940	27.22	34.0
5	C 1/1	Liv. 1	Pil.8	Pilastro	94	188	3.099	6940	33.41	41.8
6	C 1/2	Liv. 1	8-9	Trave	94	188	2.988	6940	31.0	38.8

Misure ultrasoniche sulle carote

Iden.	Pos.	Piano	Tipo	Distanza	Tempo	Vel.
				[cm]	[μ sec]	[m/sec]
C-1/1	Pil.7	-1	Diretta	18.8	42.6	4413.146
C-1/2	Pil.10	-1	Diretta	18.8	44.6	4215.247
C-1/3	Pil.15	-1	Diretta	18.8	43.8	4292.237
C-1/4	Pil.20	-1	Diretta	18.8	42.8	4392.523
C 1/1	Pil.8	1	Diretta	18.8	40.6	4630.542
C 1/2	Trave 8-9	1	Diretta	18.8	41.4	4541.063

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa a)

Iden.	Vel. [m/sec]	Rc MPa	Rcarote MPa
C-1/1	4413.15	48.248	34.2
C-1/2	4215.25	33.589	31.6
C-1/3	4292.24	38.671	32.9
C-1/4	4392.52	46.461	34.0
C 1/1	4630.54	71.822	41.8
C 1/2	4541.06	60.974	38.8

Sez. Carote Sez.Ultras.	Sez.Scler.	Indice Rimbalzo dalla media R	Ultras Velocità V [m/sec]	Rc Sonreb (RILEM) [MPa]
C-1/4	SC-1/4	48	4392.5	51.40
C-1/1	SC-1/1	48	4413.1	52.03
C-1/3	SC-1/3	44	4292.2	42.86
U 14	SC 14	56	4504.5	68.10
U 13	SC 13	59	4708.1	82.19
C-1/2	SC-1/2	42	4215.2	38.31
U 18	SC 18	46	4279.2	45.25

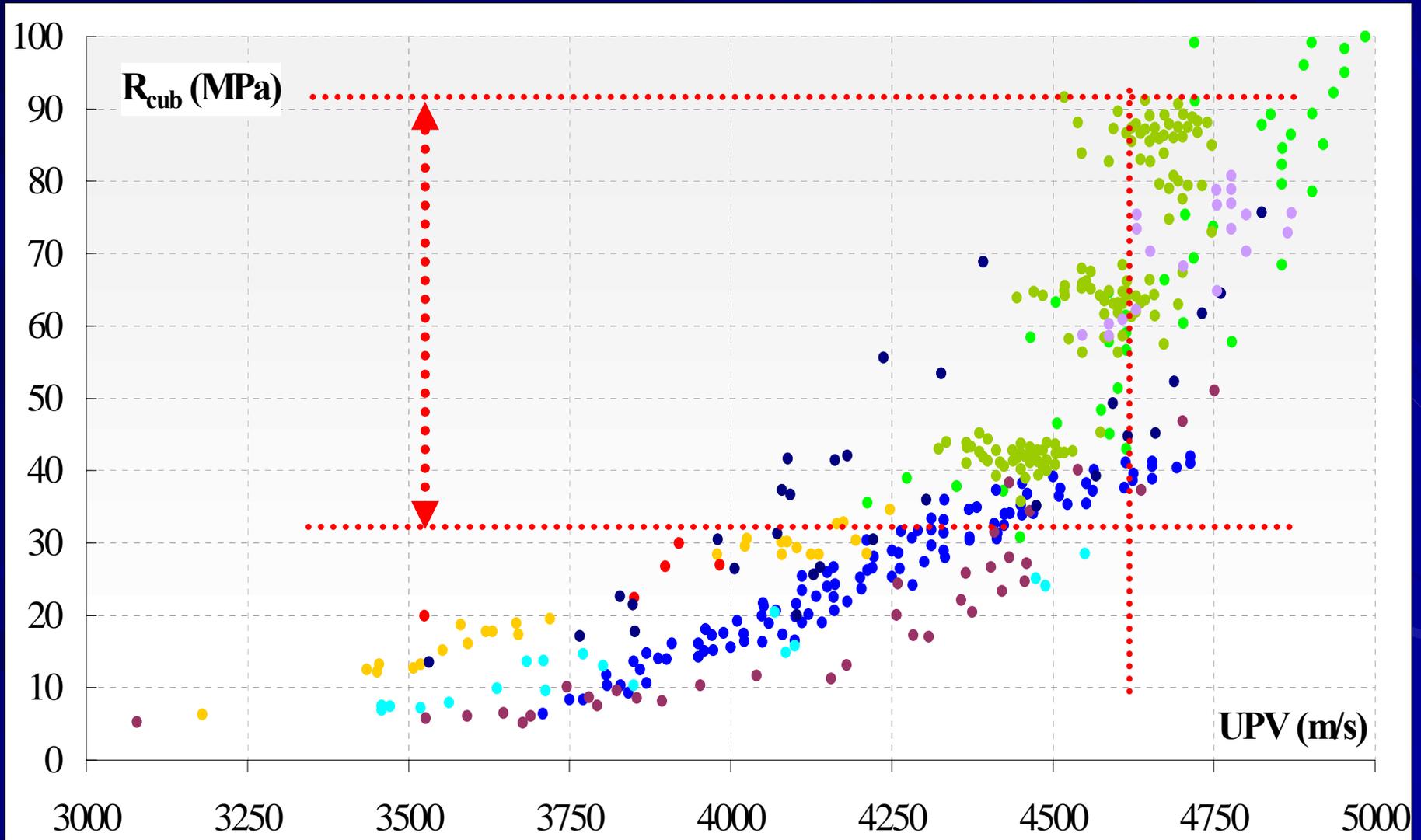
Raccomandazioni RILEM

$$R_c = 7,695 \cdot 10^{-10} \cdot R^{0,25} \cdot V^{2,6}$$

$$R_c = 0.015 \cdot \exp(1.83 \cdot V^{2,6})$$

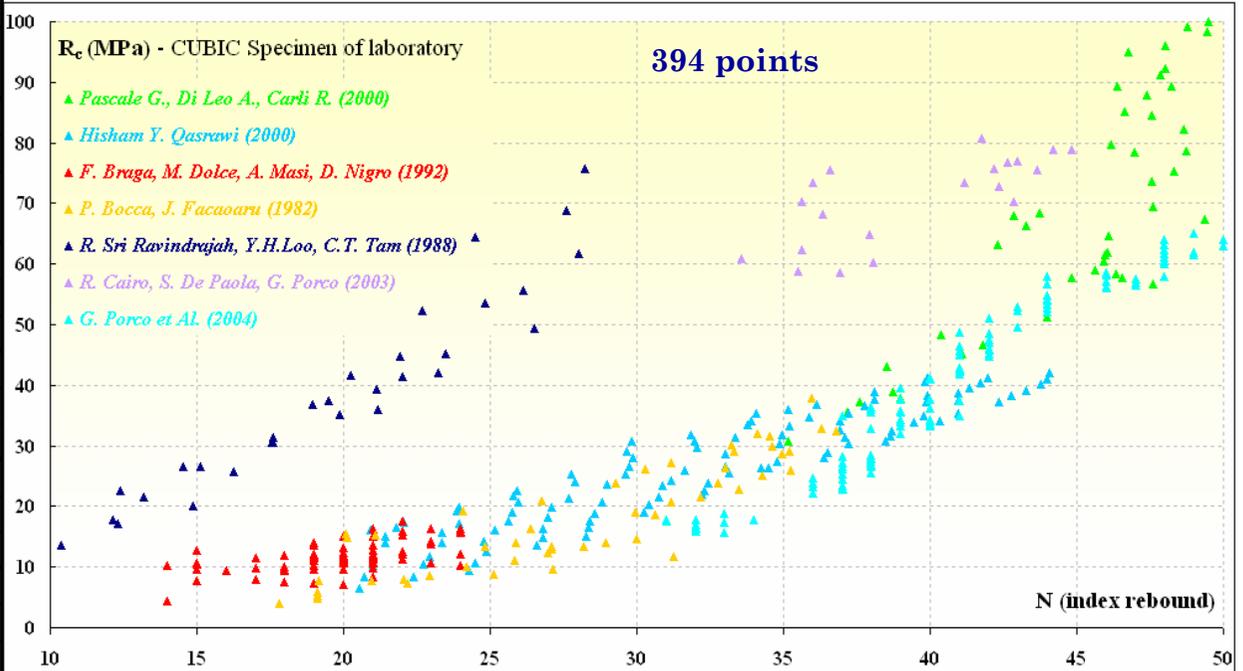
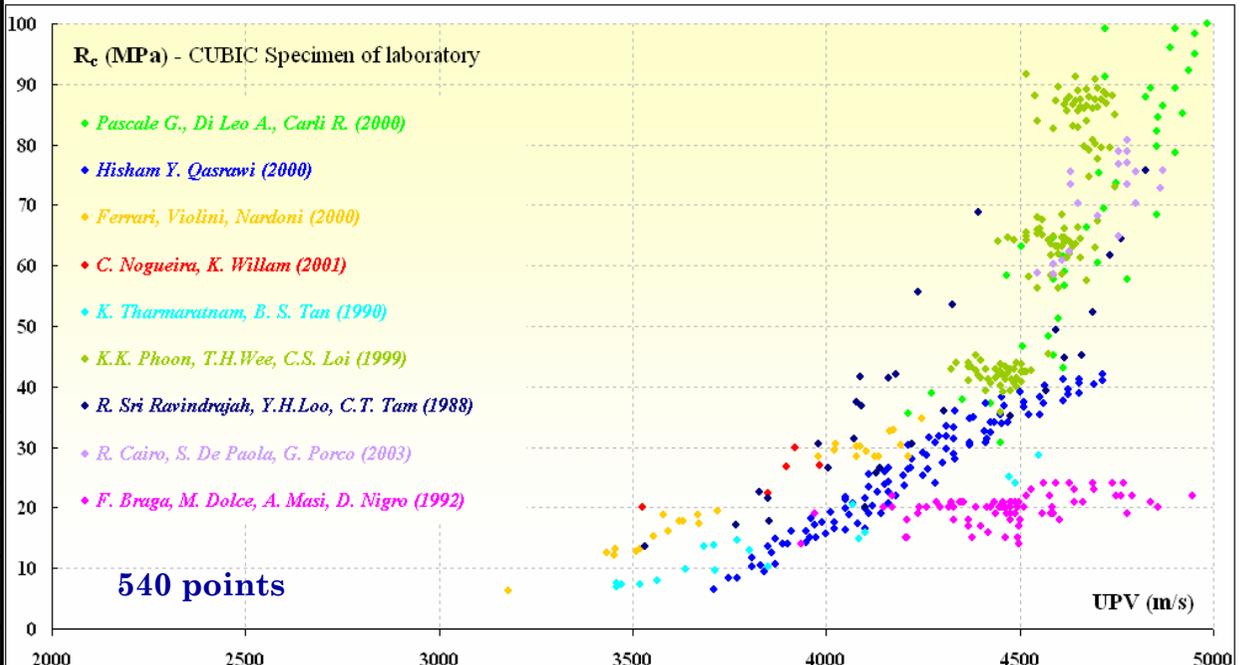
Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto



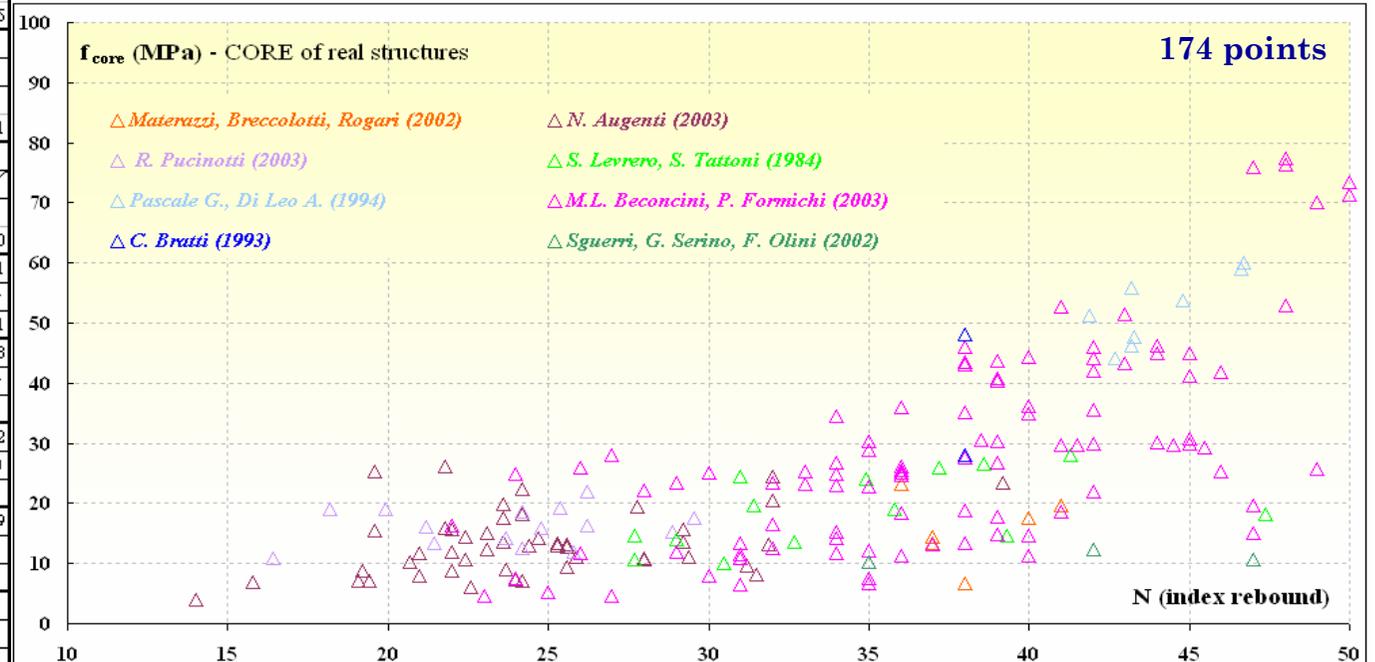
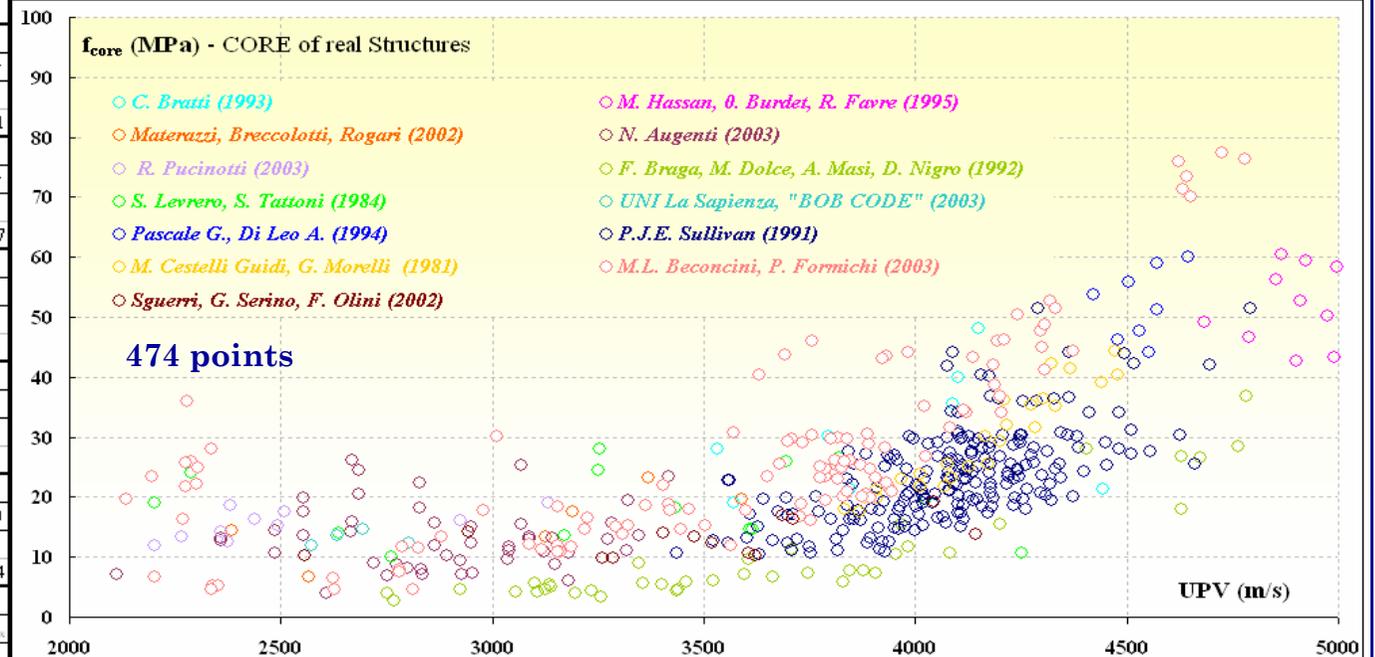
Resistenza cubica

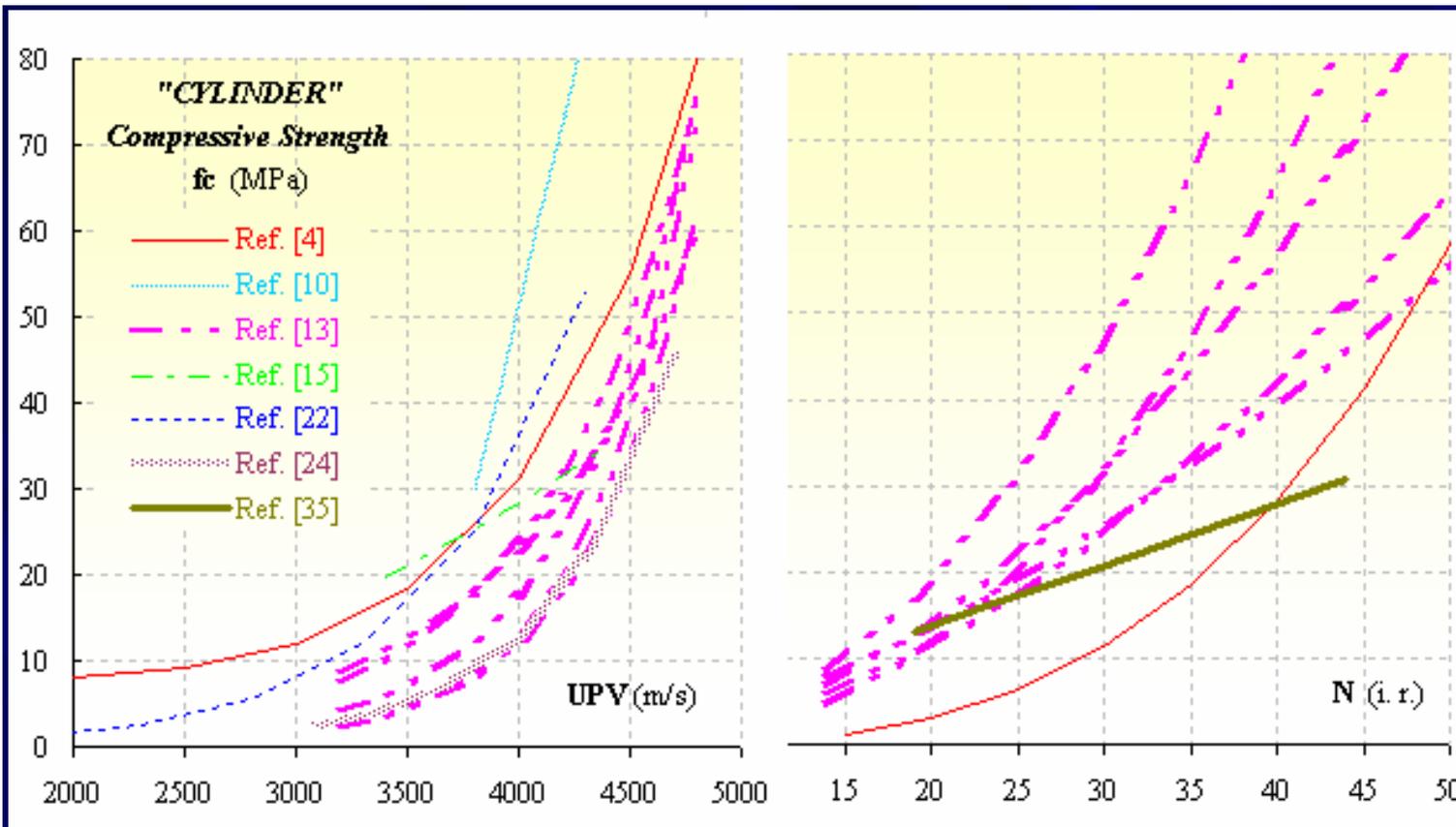
"CUBIC" Compressive Strength and In-Place Test Result		Number of DATA	AVERAGE	% standard deviation	C. of variation, %
P. Bocca, J. Facaoaru (1982)	R_c (MPa)	50	18	9	49
	dimensions of specimen =	150x150x150			
	N (index rebound)	50	28	6	20
F. Braga, M. Dolce, A. Masi, D. Nigro (1992)	R_c (MPa)	80	11,6	2	20
	dimensions of specimen =	150x150x150			
	N (index rebound)	80	20	2,4	12
R. Cairo, S. De Paola, G. Porco (2003)	UPV (m/s)	80	4483	206	4,6
	R_c (MPa)	20	70,6	7	10
	dimensions of specimen =	150x150x150			
Hisham Y. Qasrawi (2000)	N (index rebound)	20	40	3,6	9
	UPV (m/s)	20	4714	97	2,1
	R_c (MPa)	105	26,0	9	35
Pascale G., Di Leo A., Carli R. (2000)	dimensions of specimen =	150x150x150			
	N (index rebound)	105	32	7	22
	UPV (m/s)	105	4227	251	5,9
R. Sri Ravindrajah, Y.H.Loo, C.T. Tam (1988)	R_c (MPa)	109	101	31	31
	dimensions of specimen =	150x150x150			
	N (index rebound)	109	50	5	10
Ferrari, Violini, Nardoni (2000)	UPV (m/s)	105	4904	218	4,4
	R_c (MPa)	30	39	16	41
	dimensions of specimen =	100x100x100			
C. Nogueira, K. Willam (2001)	N (index rebound)	30	20	5,2	26
	UPV (m/s)	30	4242	330	7,8
	R_c (MPa)	28	23	8	36
K.K. Phoon, T.H.We, C.S. Loi (1999)	dimensions of specimen =	150x150x150			
	UPV (m/s)	28	3829	312	8
	R_c (MPa)	5	25	4	16
K. Tharmaratnam, B. S. Tan (1990)	dimensions of specimen =	76,2x76,2x152,4			
	UPV (m/s)	5	3835	180	5
	R_c (MPa)	128	64	18	28
F. Braga, M. Dolce, A. Masi, D. Nigro (1992)	dimensions of specimen =	150x150x150			
	UPV (m/s)	128	4567	106	2
	R_c (MPa)	35	15	7	47
P. Bocca, J. Facaoaru (1982)	dimensions of specimen =	var			
	UPV (m/s)	35	3889	359	9



Resistenza delle carote

"CORE" Compressive Strength and In-Place Test Result		Number of DATA	AVERAGE	Standard deviation	C. of variation, %
N. Augenti (2003)	f_{core} (MPa)	48	13,3	5	40
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	var
	N (index rebound)	48	24	4,6	19
	UPV (m/s)	48	2881	290	10,1
M.L. Beconcini, P. Formichi (2003)	f_{core} (MPa)	67	27,2	21	76
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	var
	N (index rebound)	62	37	7,5	20
	UPV (m/s)	56	3718	768	20,7
P. Bocca, J. Facaoaru (1982)	f_{core} (MPa)	8	30,4	10	34
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	92
	N (index rebound)	18	38	2,3	6
	UPV (m/s)	24	3860	238	6,2
Pascale G., Di Leo A. (1994)	f_{core} (MPa)	8	52,0	9	17
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	97
	N (index rebound)	8	41	2,1	5
	UPV (m/s)	8	4568	98	2,1
Materazzi, Breccolotti, Rogari (2002)	f_{core} (MPa)	6	15,8	6	36
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	100
	N (index rebound)	6	38	2	5
	UPV (m/s)	6	3038	468	15,4
R. Pucinotti (2003)	f_{core} (MPa)	16	15,7	4	23
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d >	$3i_{max}$
	N (index rebound)	15	24	3,7	16
	UPV (m/s)	13	2259	576	25,5
L. Sguerri, G. Serino, F. Olini (2002)	f_{core} (MPa)	13	13,0	3	23
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	94
	N (index rebound)	3	41	6	15
	UPV (m/s)	13	3450	453	13,1
S. Levrero, S. Tattoni (1984)	f_{core} (MPa)	14	18,8	6	32
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong$		d =	
	N (index rebound)	14	35	5,7	17
	UPV (m/s)	14	3287	623	19,0
F. Braga, M. Dolce, A. Masi, D. Nigro (1992)	f_{core} (MPa)	40	10,0	8	83,1
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	var
	UPV (m/s)	40	3659	551	15,1
M. Cestelli Guidi, G. Morelli (1981)	f_{core} (MPa)	26	28,6	8	27,3
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong$		d =	var
	UPV (m/s)	28	4165	188	4,5
M. Hassan, O. Burdet, R. Favre (1995)	f_{core} (MPa)	13	53,6	7	13,2
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	100
	UPV (m/s)	13	4947	149	3,0
P.J.E. Sullivan (1991)	f_{core} (MPa)	207	23,4	8	32,9
	length-to-diameter ratio	$l/d > 0,8$		d =	50
	UPV (m/s)	207	4080	234	5,7
"BOB CODE" (2003)	f_{core} (MPa)	4	13,1	1	9,2
	length-to-diameter ratio	$l/d \cong 2$		d =	44
	UPV (m/s)	4	2674	99	3,7





Metodo SONREB

$$[\text{Ref. 4}] \quad f_c = 5,9 + 2,712 \cdot 10^{-15} \cdot N \cdot \text{UPV}$$

$$[\text{Ref. 13}] \quad f_c = e^{-1,554 + 0,0584N + 0,750\text{UPV}}$$

$$[\text{Ref. 13}] \quad f_c = 1 / (0,127 - 0,0009N - 0,0156\text{UPV})$$

$$[\text{Ref. 13}] \quad f_c = -35,95 + 0,507N + 11,02\text{UPV}$$

Correlazioni tra
Resistenza e
parametri di
riferimento

Analisi statistica dei dati

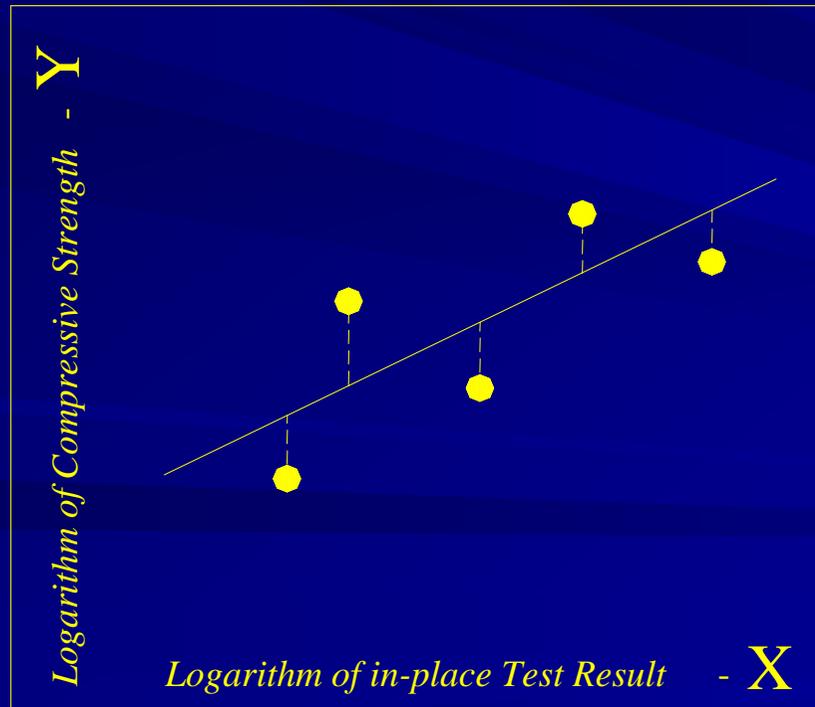
Correlazione tra:

- Risultati prove in-situ “variabile indipendente X”
- Resistenza a compressione “variabile dipendente Y”

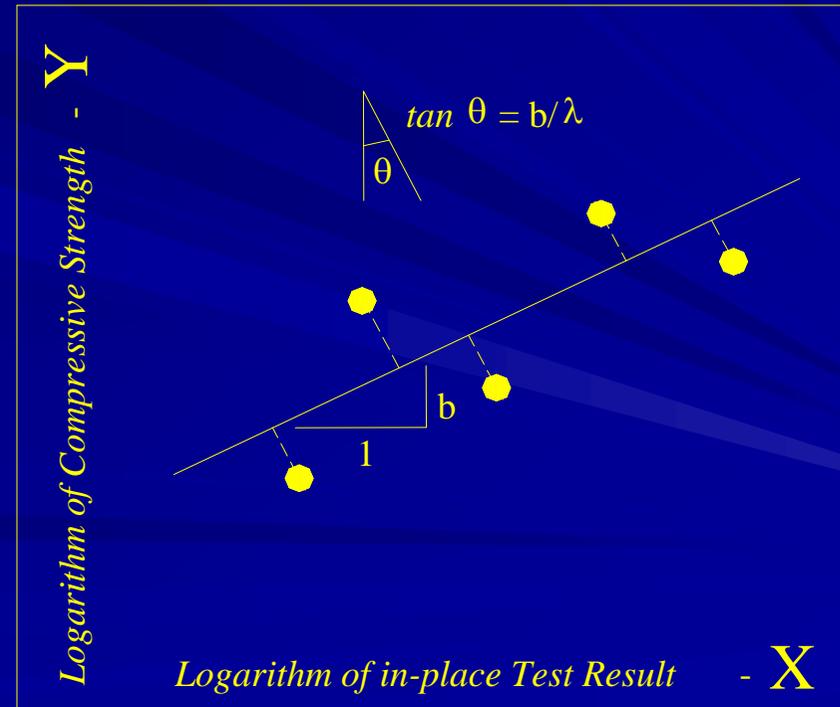
La definizione della relazione tra resistenza e misura di riferimento è ottenuta da un’ “Analisi di Regressione”

More refined procedure

a) Analisi dei minimi quadrati



b) Approccio di Mandel (ACI 228.1R-03)



Analisi statistica dei dati

Approccio di Mandel (ACI 228.1R-03)

Analisi di regressione con X-error

Relazione lineare:

$$Y = a + bX \quad \text{where } Y = \ln C, \text{ media logaritmi naturali della resistenza a compressione;}$$

$a = \ln A$, intercetta all'origine;
 $b = B$, coefficiente angolare;
 $X = \ln \text{NDT}$, media logaritmi naturali parametri NDT.

Power function:

$$C = e^a \text{NDT}^B = A \text{NDT}^B$$

Flusso della procedura

1. Definizione dei j livelli di resistenza
2. Calcolo per ciascun LR della media e della deviazione standard dei logaritmi (X_j and Y_j)
3. Calcolo di λ , come la varianza della variabile Y diviso la varianza della variabile X
4. Valutazione dei parametri b e λ con un processo iterativo
5. Stima della curva di interpolazione
6. Calcolo dell'errore di interpolazione s_e , necessario per il calcolo dell'incertezza nella stima del valore medio della resistenza

Statistical analysis of collected data

Method by Stone and Reeve (ACI 228.1R-03)

Standard deviation of estimated Y-value s_Y ,
incorporated the *uncertainty* of the average in-place result
from tests on the structure

Alternative Method by Carino (ACI 228.1R-03)

LOWER CONFIDENCE LIMIT of the estimated
Strength Relationship at desired risk level:

$$Y_{low} = Y - (t_{m-1, \alpha} s_Y)$$

where Y = lower confidence limit at risk level α ;

$t_{m-1, \alpha}$ = Student t-value from $m-1$ degrees
of freedom and risk level α ;

m = the number of replicate in-place tests.

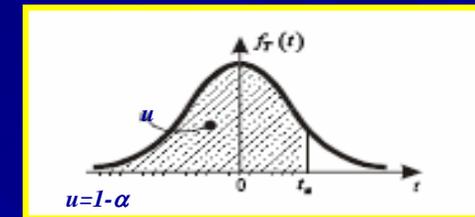
Tenth-Percentile Strength:

$$Y_{0,10} = Y_{low} - 1,282s_{cf}$$

where $Y_{0,10}$ = logarithm of strength to be exceeded
by 90% of the population;

s_{cf} = standard deviation of logarithms
of concrete strength in the structure.

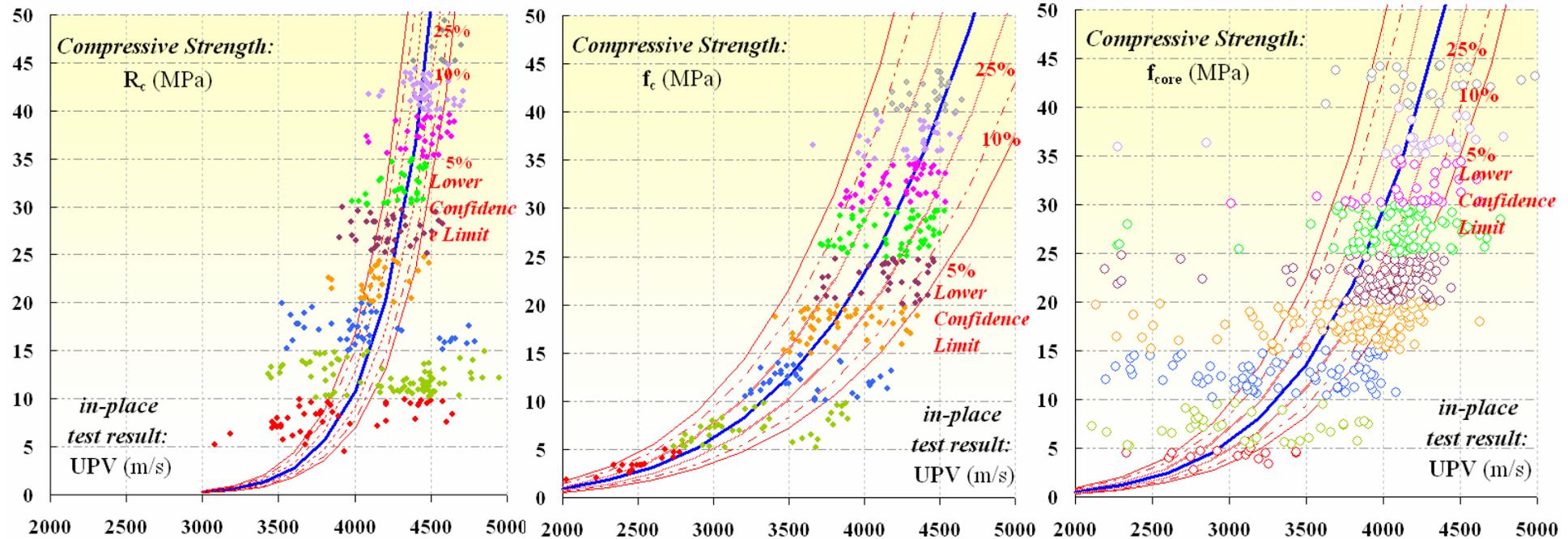
Student's t-Distribution
 $t(m-1)$



(Hatrella 1963)	$t_{m-1; \alpha}$	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,10$
m-1		
2	2,920	1,886
3	2,353	1,638
4	2,132	1,533
5	2,015	1,476
6	1,943	1,440
7	1,895	1,415
8	1,860	1,397
9	1,833	1,383
10	1,812	1,372
11	1,796	1,363
12	1,782	1,356
13	1,771	1,350
14	1,761	1,345
15	1,753	1,341

Alcuni esempi

Prove non distruttive: Misura della Velocità ultrasonica



“Resistenza cubica”

$$R_c = 7,81 \cdot 10^{-46} UPV^{12,809}$$

error of fit $s_e = 0,283$

“Resistenza cilindrica”

$$f_c = 5,5 \cdot 10^{-16} UPV^{4,616}$$

error of fit $s_e = 0,187$

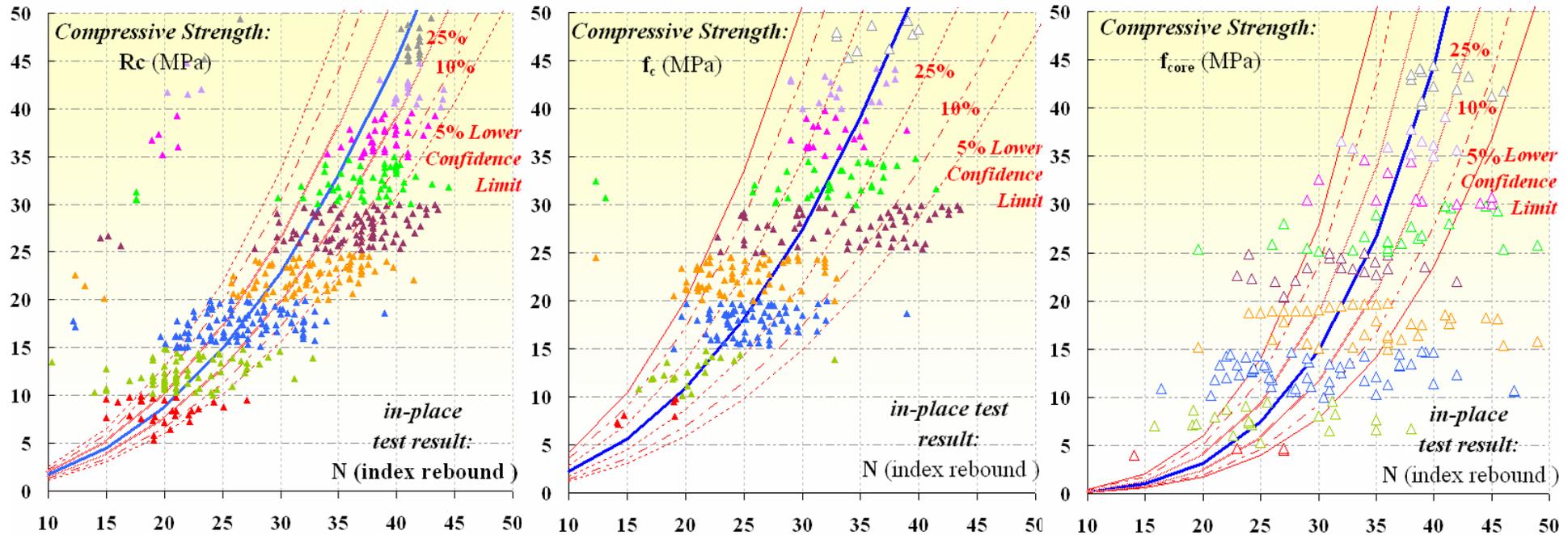
“Carote”

$$f_{core} = 7,5 \cdot 10^{-20} UPV^{5,716}$$

error of fit $s_e = 0,157$

Results and Discussion

NONDESTRUCTIVE TEST: Measure of Index Rebound



“CUBE Strength”

$$R_c = 7,52 \cdot 10^{-3} N^{2,359}$$

error of fit $s_e = 0,145$

“CYLINDER Strength”

$$f_c = 1,17 \cdot 10^{-2} N^{2,281}$$

error of fit $s_e = 0,170$

“CORE Strength”

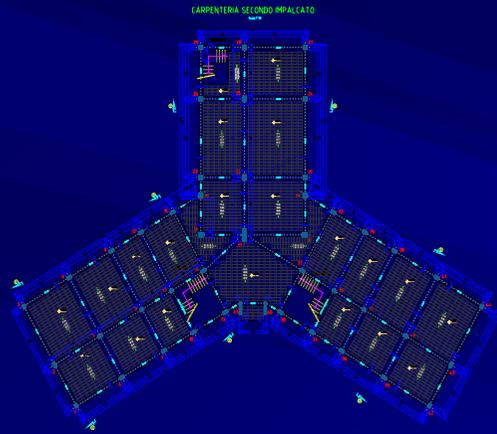
$$f_{core} = 3,54 \cdot 10^{-5} N^{3,81}$$

error of fit $s_e = 0,109$



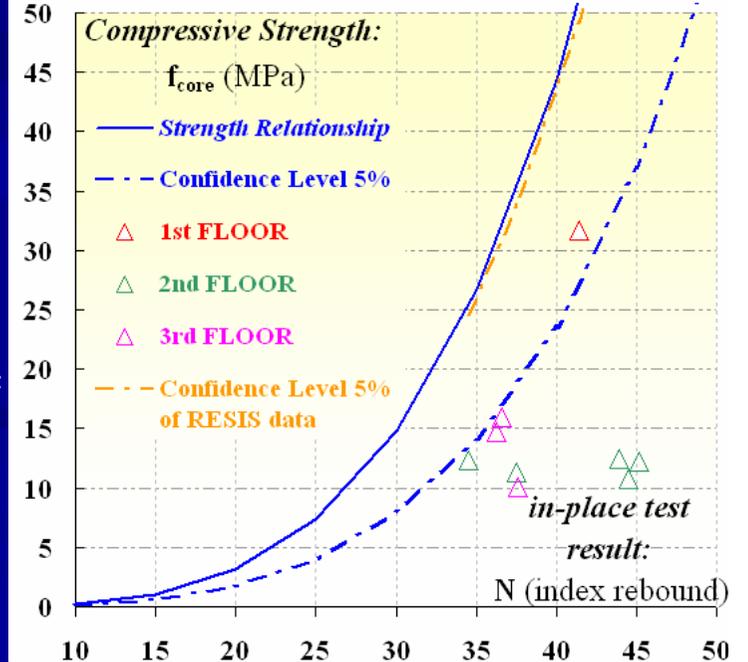
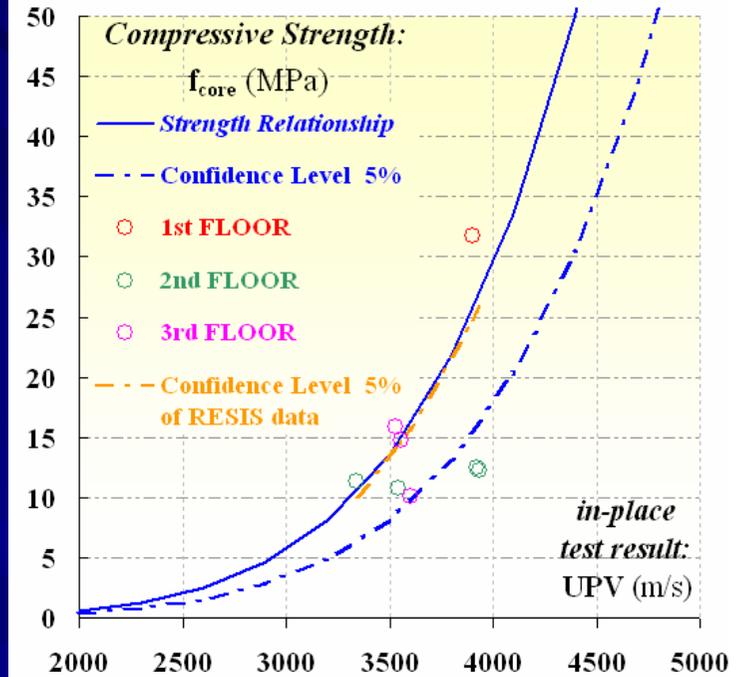
Estimate of
in place-compressive strength
using UPV results

$$f_{core_{0,10}} = 11,52 \text{ MPa}$$



Estimate of
in place-compressive strength
using IR results

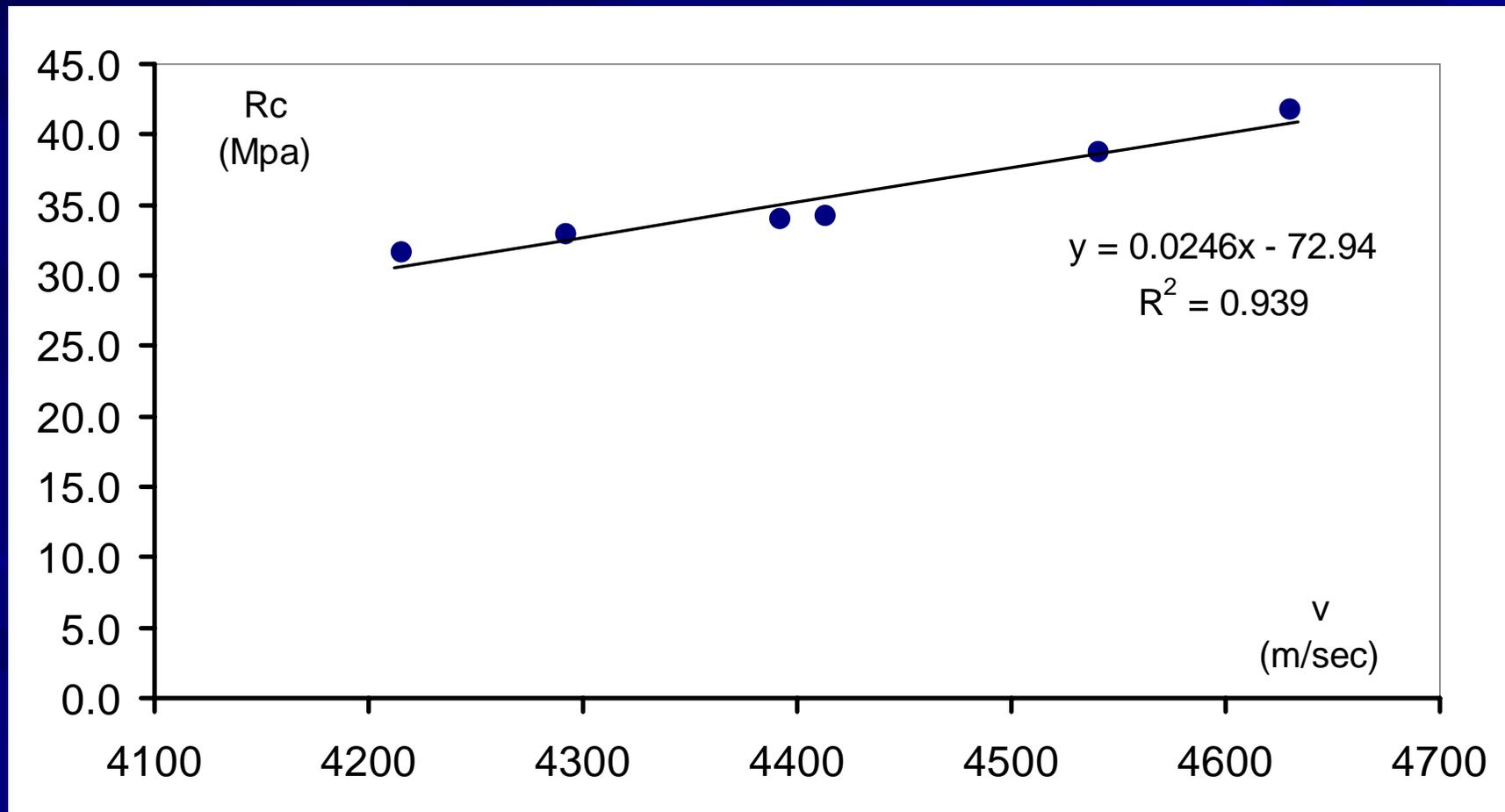
$$f_{core_{0,10}} = 26,57 \text{ MPa}$$



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa a)



Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa b)

I – Esecuzione di prove su carote $\Rightarrow f_{c, car}$

II – Misure sclerometriche e ultrasoniche $\Rightarrow N, UPV$

III – Calcolo della resistenza cubica in sito equivalente

$$\Rightarrow f_{c, car Eq} = 2,5 f_{c, car} / (1,5 + \phi/H) \text{ (*British Standards 1881: Part 120)}$$

IV – Calcolo della resistenza iniziale nei punti di prelievo delle carote

in base alla *correlazione disponibile*

$$\Rightarrow f_{c, SONREB} = 1,2 \cdot 10^{-9} N^{1,058} UPV^{2,446} \text{ (Metodo Combinato – *A. di Leo et al.)}$$

V – Calcolo del *coefficiente globale d'influenza* $C=0,63$

$$\Rightarrow C = \Sigma (f_{c, car Eq} / f_{c, SOREB}) / N_{tot}$$

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa b)

V – Calcolo del *coefficiente globale d'influenza* $C=0,63$

$$\Rightarrow C = \Sigma (f_{c, car Eq} / f_{c, SONREB}) / N_{tot}$$

elemento strutt.		H (mm)	ϕ (mm)	peso (gr)	Velocità (m/s)	Sclerometro (ind. rimb)	$f_{c, car}$ (MPa)	$f_{c, car Eq}$ (MPa)	$f_{c, SONREB}$ (MPa)	$f_{c, car Eq} / f_{c, SONREB}$	
impalcato	indagato										
I	P. 21	1	150	75	1473	3900	41,4	31,70	39,63	37,47	1,06
II	T. 21-22	2	149	75	1542	3937	45,2	12,20	15,22	42,09	0,36
II	P. 38	3	150	75	1580	3922	43,9	12,50	15,63	40,41	0,39
II	T. 38-41	4	151	75	1423	3338	37,5	11,30	14,15	23,06	0,61
II	P. 22	5	198	99	3430	3937	34,5	12,30	15,38	31,62	0,49
III	P. 4	6	149	75	1440	3556	36,3	14,70	18,34	26,02	0,71
III	P. 24	7	149	75	1513	3531	36,6	15,90	19,84	25,80	0,77

Resistenza a compressione del calcestruzzo

Le prove non distruttive di supporto

Alternativa b)

VI – Calcolo di valori di resistenza calibrati, in tutti i punti di misura

$$\Rightarrow f_{c, st} = C f_{c, SONREB}$$

VII - Calcolo del valore medio

$$\Rightarrow f_{c, st MED} = 19,21 MPa$$

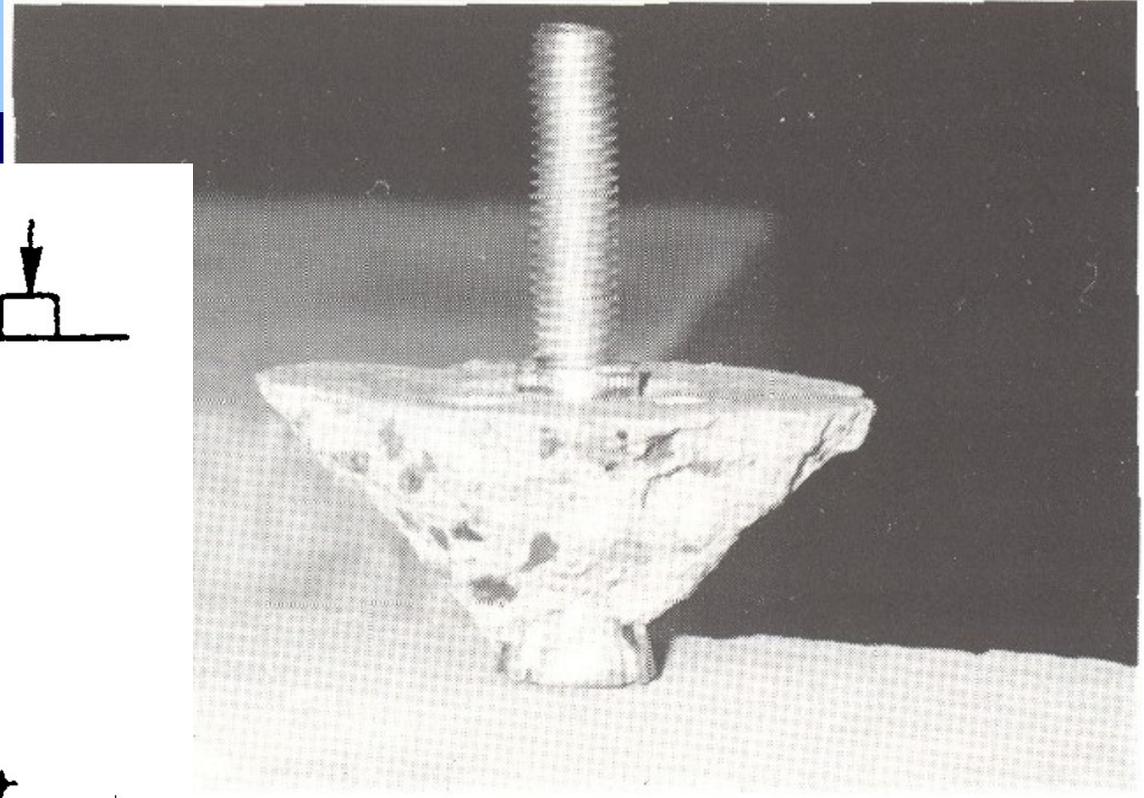
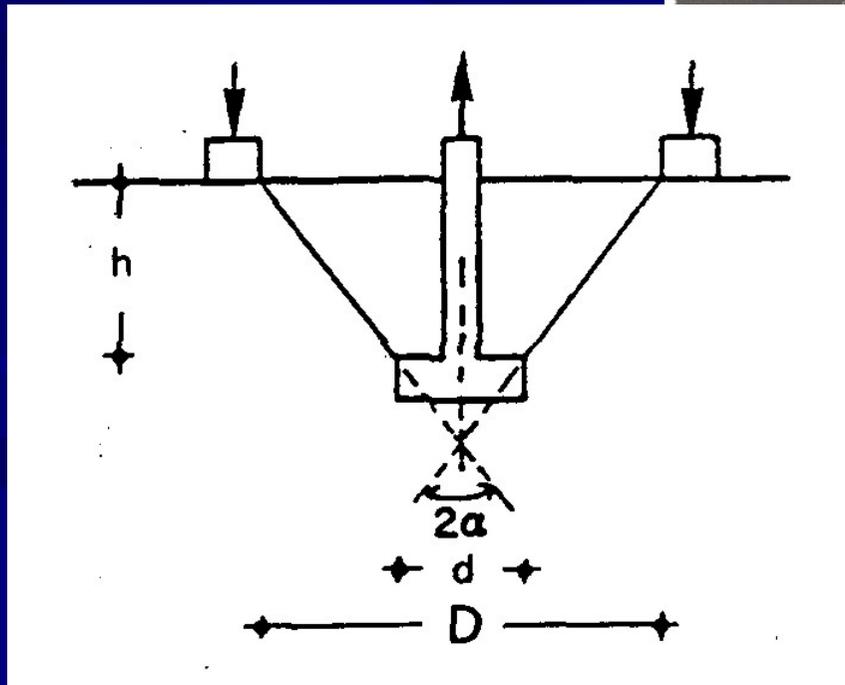
impalcato	elemento strutt. indagato	Velocità (m/s)	Sclerometro (ind. rimb)	$f_{c, SONREB}$ (MPa)	$f_{c, St}$ (MPa)
	I P. 21	3900	41,4	37,47	23,44
	I T. 2-5	4286	36,7	41,54	25,99
	I P. 5	3289	35,4	20,93	13,09
	I T. 40-43	3922	35,4	32,19	20,14
	II T. 21-22	3937	45,2	42,09	26,33
	II P. 38	3922	43,9	40,41	25,29
	II T. 38-41	3338	37,5	23,06	14,43
	II P 22	3937	34,5	31,62	19,79
	III P. 4	3556	36,3	26,02	16,28
	III P. 24	3531	36,6	25,80	16,14
	III P. 17	3731	37,5	30,29	18,95
	III T. 17-31	3414	37,8	24,58	15,38
sotto tetto	T. 22-25	3531	38,3	27,07	16,94
sotto tetto	P 22	3531	40,7	28,86	18,06
sotto tetto	T.34-37	3531	40,2	28,49	17,83

Prove di pull-out sul calcestruzzo:

- Si misura la forza di estrazione di un tassello appositamente inserito nel calcestruzzo e si ottiene una stima della resistenza del calcestruzzo in situ utilizzando la seguente correlazione:

$$R_{cub} = 9.41 + 0.92 \cdot F \quad [N / mm^2]$$

(F in kN)



Prelievo dei ferri di armatura



Prove su materiali e strutture

Prove per la caratterizzazione dell'acciaio:

- **prelievo di campioni di barre di armatura** da elementi strutturali significativi (preferibilmente in zone poco sollecitate);
- **prove di trazione** (in laboratorio) con determinazione diretta della resistenza a trazione dell'acciaio e dell'allungamento a rottura;
- **prova di tipo "distruttivo"**: è necessario l'immediato ripristino delle armature prelevate mediante saldatura di nuovi monconi di armatura alle armature esistenti nelle zone di prelievo;
- **in genere i valori della resistenza a trazione sono "poco dispersi"** per ciascuna tipologia di acciaio: possibile riduzione del numero di prove ?

4. I dati necessari per la valutazione

■ Alcune considerazioni sulle prove materiali

Le prove sugli acciai sono finalizzate all'identificazione della classe dell'acciaio utilizzata con riferimento alla normativa vigente all'epoca di costruzione. Ai fini del raggiungimento del numero di prove sull'acciaio necessario per il livello di conoscenza è opportuno tener conto dei diametri (nelle strutture in c.a.) di più diffuso impiego negli elementi principali con esclusione delle staffe.

Ai fini delle prove sui materiali è consentito sostituire alcune prove distruttive, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

Il numero di provini riportato nelle tabelle potrà esser variato, in aumento o in diminuzione, in relazione alle caratteristiche di omogeneità del materiale. Nel caso del calcestruzzo in opera tali caratteristiche sono spesso legate alle modalità costruttive tipiche dell'epoca di costruzione e del tipo di manufatto, di cui occorrerà tener conto nel pianificare l'indagine.

4. I dati necessari per la valutazione

I **fattori di confidenza** indicati in Tabella servono a un duplice scopo:

- a definire le resistenze dei materiali da utilizzare nelle formule di capacità degli elementi duttili e fragili. *Le resistenze medie, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono divise per i fattori di confidenza;*
- a definire le sollecitazioni trasmesse dagli elementi duttili a quelli fragili. *A tale scopo, le resistenze medie degli elementi duttili, ottenute dalle prove in situ e dalle informazioni aggiuntive, sono moltiplicate per i fattori di confidenza.*

Alcune considerazioni conclusive

- La relazione sulla diagnostica corrisponde alla relazione sui materiali per le strutture di nuova progettazione
- Il progetto delle indagini diagnostiche va documentato;
- Le indagini non distruttive vanno inquadrare opportunamente ed elaborate su base 'locale'
- Il livello di conoscenza si può conseguire in maniera articolata e varia, per cui è necessaria una specifica relazione da parte del progettista che asseveri e motivi la compatibilità del processo svolto con il dettato della normativa;
- La geometria della struttura va rappresentata graficamente non solo dal punto di vista funzionale, ma anche dal punto di vista delle armature e dei dettagli strutturali oggetto di specifico rilievo