

# PROVE PER LE STRUTTURE ESISTENTI IN C.A.

Prof. Ing. Flora Faleschini  
Dipartimento Ingegneria  
Civile, Edile e Ambientale  
VMSSE 2023/2024



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# DIAGNOSI

	TIPO	STRUMENTO
IN SITU	MAGNETOMETRICA	Magnetometro o pacometro
	ADESIONE/PULL-OFF	Martinetto, carotiere e dischi di acciaio
	TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI	Telecamera a raggi infrarossi o oscilloscopio
	SCLEROMETRICA	Martello di Schmidt o sclerometro
	ULTRASONICA	Strumento ad ultrasuoni (trasduttori e timer)
	TOMOGRAFIA SONICA	Sorgenti a percussione o trasduttori termodinamici
	SONREB	Sclerometro e strumento ad ultrasuoni
	PULL-OUT	Tasselli ad espansione e martinetti di estrazione
	CAROTAGGIO	Carotiere e corone diamantate
	COLORIMETRICHE	Soluzioni di fenoltaleina o di fluorescenza e nitrato di argento
	MAPPATURA POTENZIALE	Voltmetro o pHmetro ed elettrodo di riferimento
	UMIDITÀ	Igrometro elettrico o a carburo

# DIAGNOSI

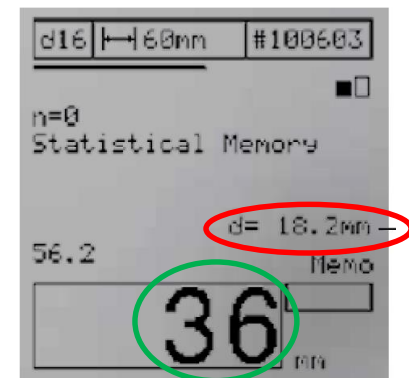
IN LABORATORIO	TIPO	STRUMENTO
	PROPRIETÀ ELASTO-MECCANICHE RESIDUE	Macchine per prove di compressione/trazione ed estensimetri, carote
	COLORIMETRICHE	Soluzioni di fenolftaleina o di fluoresceina e nitrato di argento
	UMIDITÀ	Stufa e bilancia
	ANALISI CHIMICA ELEMENTALE	Estrazione mediante acqua o acido, gascromatografia, sonda EDAX, XRF, ICP
	DIFFRAZIONE RX	Diffrattometro RX
	MICROSCOPIA OTTICA	Microscopio ottico a luce polarizzata e lampada U.V.
	MICROSCOPIA ELETTRONICA	Microscopio elettronico a scansione (SEM)
	ANALISI TERMICA	Termoanalizzatore
	POROSIMETRIA	Stufa e bilancia

# PROVE IN SITU

## Indagine magnetometrica (**pacometro**)

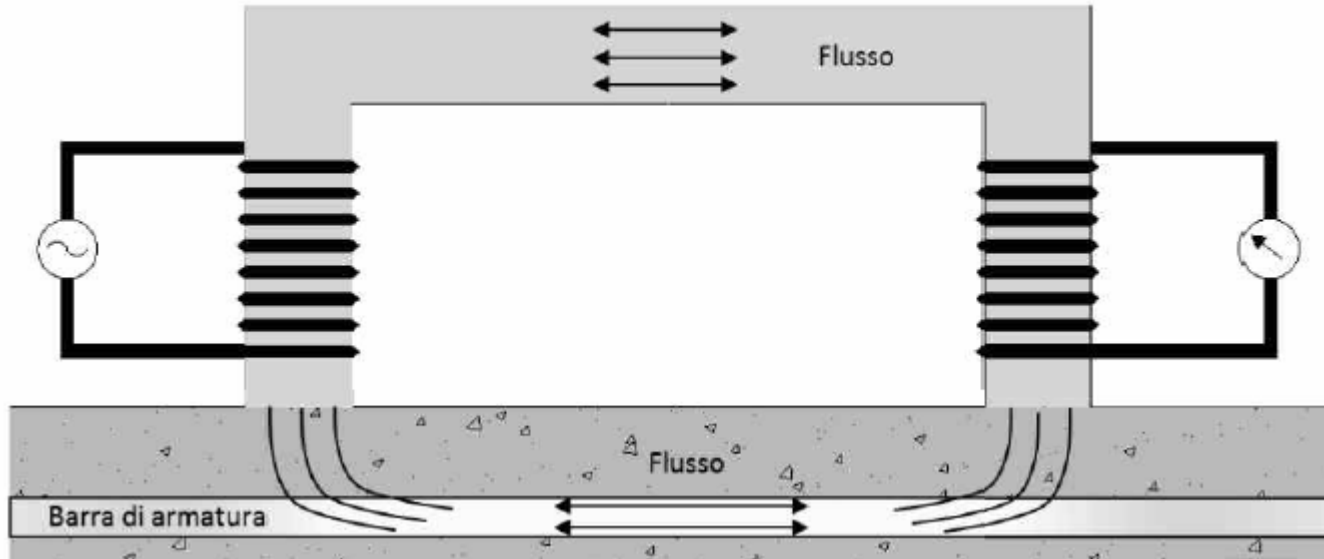
Il pacometro (o profometro o magnetometro) è una prova **NON distruttiva** che si basa sul principio dell'induzione elettro-magnetica secondo il quale la presenza di un conduttore metallico (l'armatura) altera il potenziale di un campo magnetico.

Le principali normative di riferimento risultano essere: UNI 11250, 08/11/2007, Prove non distruttive – Metodo magneto-induttivo; UNI EN ISO 9934, 2004, Prove non distruttive. Magnetoscopia; UNI EN ISO 15548, 2009 Prove non distruttive. Apparecchiatura per controllo mediante correnti indotte; UNI EN 12084, 01/11/2004, Prove non distruttive – Controllo mediante correnti indotte – Principi generali e linee guida.



# PROVE IN SITU

Indagine magnetometrica (**pacometro**): principio di funzionamento



Il campo magnetico rilevato è maggiore (maggior flusso) quando viene rilevata un'armatura.

# PROVE IN SITU

## Prove di adesione (**pull-off**)

È una prova SEMI-distruttiva che permette la valutazione della **resistenza a trazione** o della **resistenza allo strappo** di un substrato o di materiali applicati su di esso a spessore sottile.

Tecnica che viene utilizzata per la **valutazione della qualità delle MALTE, intonaci, rasature, rivestimenti** utilizzati in sede di **ripristino di una sezione in c.a. danneggiata e ricostruita**. Ha l'obiettivo di evidenziare quale materiale sia l'elemento debole del sistema ripristinato.

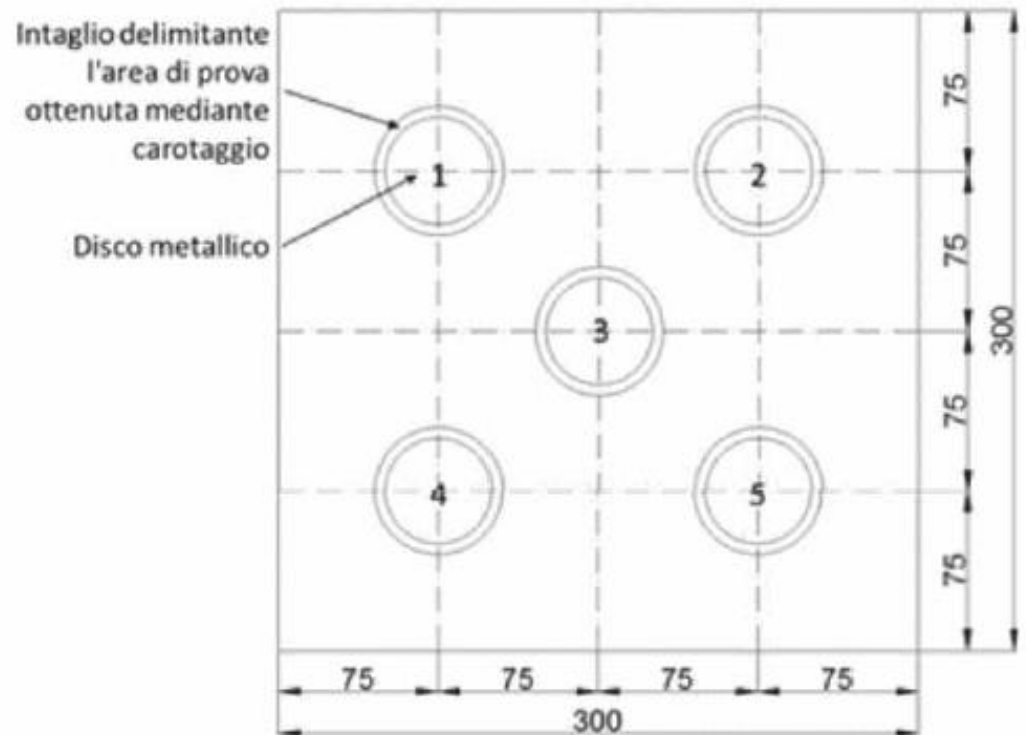
La strumentazione di prova è data da:

- Carotiere/estrattore con corona diamantata di diametro interno di 50 mm;
- Martinetto dotato di manometro tarato per la valutazione della forza di trazione applicata;
- Dischi in alluminio o acciaio di 50 mm;
- Adesivo in pasta di natura epossidica per l'incollaggio dei dischi sulla superficie da analizzare.

# PROVE IN SITU

Prove di adesione (**pull-off**): metodo di prova

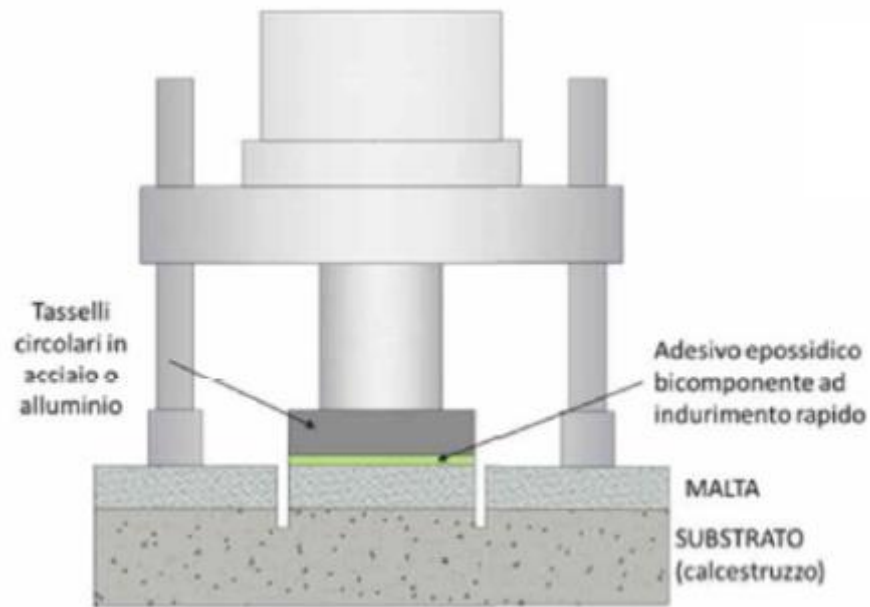
Schema di disposizione dei dischi da applicare sulla superficie dell'elemento di prova



# PROVE IN SITU

Prove di adesione (**pull-off**): metodo di prova

1. **Applicazione dei dischi** su ogni intaglio prodotto con il carotiere.
2. Una volta **indurita la resina** fra il disco e il substrato da testare, si procede con **l'estrazione** utilizzando il martinetto tarato.

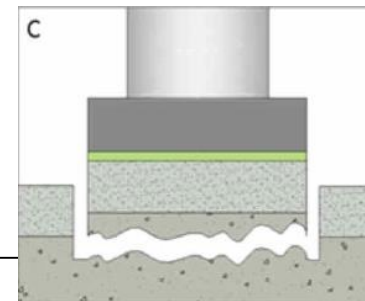
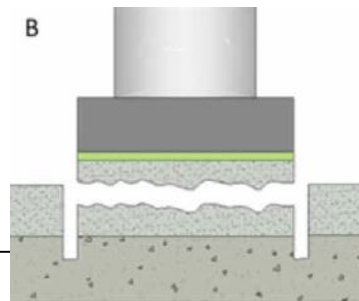
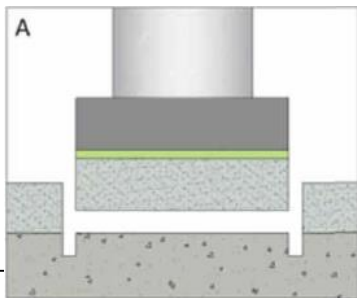




# PROVE IN SITU

Prove di adesione (**pull-off**): modalità di rottura

- Tipologia di **rottura A**: la frattura si colloca **all'interfaccia tra lo stato di materiale applicato e il substrato**. Il valore misurato coincide con la resistenza allo strappo (**adesione**). Si denota con distacco per superamento dell'adesione.
- Tipologia di **rottura B**: la frattura si colloca **all'interno dello strato di materiale più esterno**. L'adesione è maggiore della **resistenza a trazione** del materiale posto **esternamente**. Si denota con rottura coesiva dello strato di materiale riportato.
- Tipologia di **rottura C**: la frattura si colloca **all'interno dello strato di materiale più interno, nel substrato**. Sia l'adesione che la resistenza a trazione del materiale più esterno sono maggiori della resistenza a trazione del materiale originario. Si denota con **rottura coesiva del substrato**.



# PROVE IN SITU

Prove di adesione (**pull-off**): interpretazione risultati per interventi di ripristino sezionale

Un **buon intervento di ripristino** evidenzierà, in questo tipo di prova, una rottura di **tipo C**, evidenziando una buona qualità delle malte e del sistema di rasatura utilizzato.

Al contrario, un collasso dell'interfaccia (**rottura tipo A**), necessita di analizzare il valore della tensione di strappo e confrontarla con quella riportata nella **scheda tecnica** del prodotto e le minime resistenze prescritte in normativa.

Es. malta strutturale (classe R3 o R4, EN 1504-3):

R3: Adesione al calcestruzzo dopo 28 gg  $> 1.5 \text{ N/mm}^2$  (in laboratorio);

R4: Adesione al calcestruzzo dopo 28 gg  $> 2.0 \text{ N/mm}^2$  (in laboratorio);

In opera, si possono ritenere accettabili valori pari a quelli ottenibili in laboratorio, ridotti del 20%:

R3: Adesione al calcestruzzo dopo 28 gg  $> 1.2 \text{ N/mm}^2$  (in opera);

R4: Adesione al calcestruzzo dopo 28 gg  $> 1.6 \text{ N/mm}^2$  (in opera).

# PROVE IN SITU

Prove di adesione (**pull-off**): interpretazione risultati

SISTEMA MULTISTRATO	ROTTURA COESIVA		ROTTURA ADESIVA ALL'INTERFACCIA
	Substrato in calcestruzzo	Malta da ripristino	
Malta da ripristino e substrato in calcestruzzo	Esito positivo	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione della malta da ripristino ridotta del 20%
Malta per rasatura/malta da ripristino	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione della malta per rasatura ridotta del 20%
Malta per rasatura e substrato in calcestruzzo	Esito positivo	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione della malta per rasatura ridotta del 20%
Rivestimento filmogeno e malta per rasatura	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione del rivestimento ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione del rivestimento filmogeno ridotta del 20%
Rivestimento filmogeno e malta da ripristino	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione della malta ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione del rivestimento ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione del rivestimento filmogeno ridotta del 20%
Rivestimento filmogeno e substrato in calcestruzzo	Esito positivo	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza a trazione del rivestimento ridotta del 20%	Esito positivo se il valore è maggiore della resistenza all'adesione del rivestimento filmogeno ridotta del 20%

# PROVE IN SITU

## Termografia ad infrarossi

La termografia è una tecnica non distruttiva che opera utilizzando la banda delle radiazioni infrarosse.

In base al differente **coefficiente di conducibilità termica** posseduto dai materiali che compongono gli strati più esterni di pareti e soffitti, la distribuzione delle **temperature cedute verso l'ambiente** dai diversi materiali che compongono le strutture viene riconosciuta dalla termocamera sullo strato di intonaco preso in esame. Si risale così alla mappa termica della “scena” inquadrata mediante l'interpretazione della radiazione percepita dall'elemento sensibile della termocamera stessa.

Normativa di riferimento:

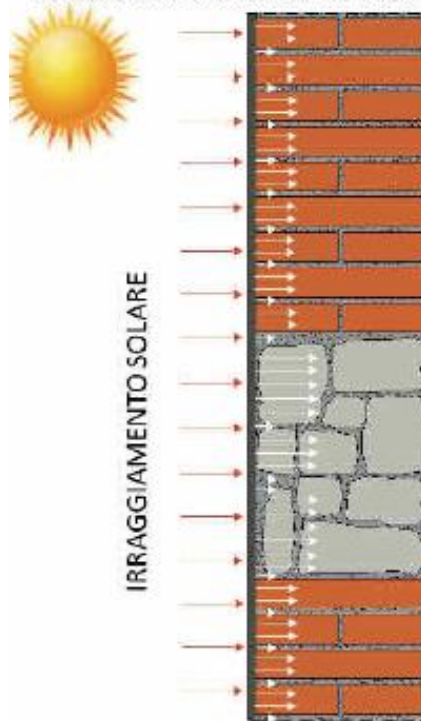
- UNI 10824-1/2000 Prove non distruttive - Termografia all'infrarosso - Termini e definizioni.



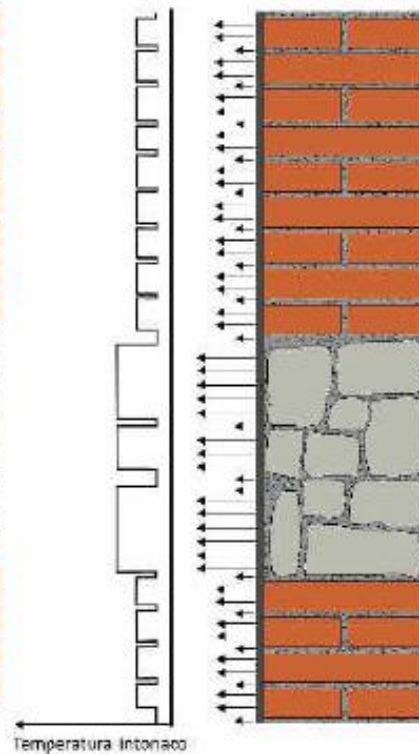
# PROVE IN SITU

## Termografia ad infrarossi

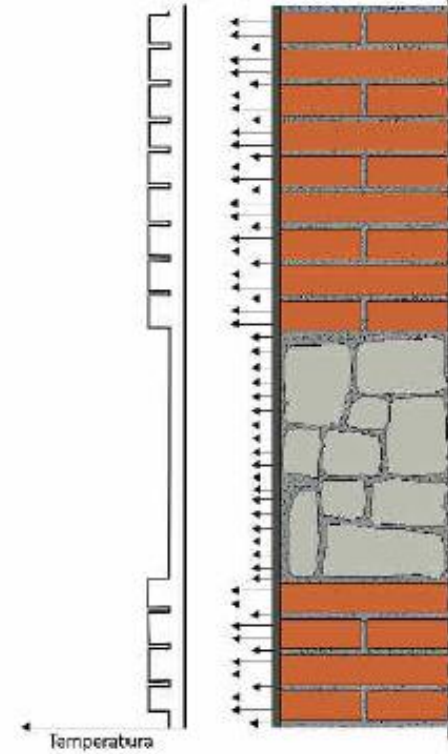
IRRAGGIAMENTO SOLARE E CONDUZIONE DEL CALORE DENTRO ALLA STRUTTURA



EMISSIONE DI RADIAZIONE TERMICA DALLA SUPERFICIE INTONACATA (le zone più calde sono maggiormente emissive)



RIPRESA TERMOGRAFICA ( $T_{\text{pietra}} < T_{\text{intonaco}}$  pertanto l'intonaco che ricopre la pietra è meno emissivo)

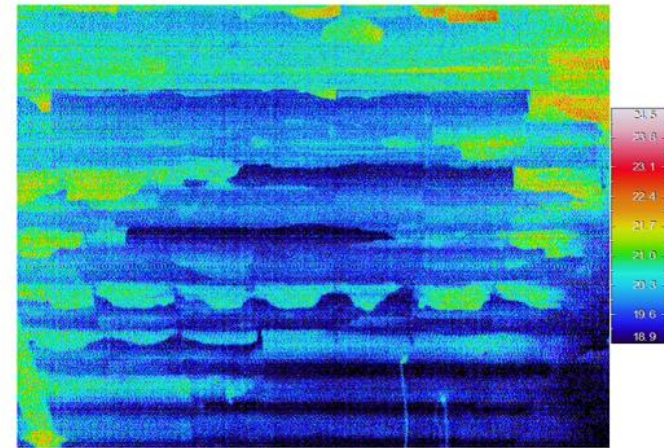


# PROVE IN SITU

Termografia ad infrarossi: applicazioni tipiche

- **tamponamenti** di aperture nelle murature sotto intonaco;
- **differenti materiali** componenti una muratura e ricoperti da uno strato di intonaco come corsi di malta e mattoni, ciottoli, inserimento di architravi e colonne in pietra, inserti in legno, ferro;
- **orditure di elementi** strutturali di sostegno in solai piani;
- **canalizzazione** di impianti idrico sanitari e termici in funzione;
- la distribuzione **dell'umidità nelle murature** (mappe termoigrometriche);
- la presenza di **ponti termici**;
- **dispersioni termiche** dovute ad insufficiente coibentazione.

Inoltre, poiché l'emissione di calore dipende anche dalla **presenza di fessure e discontinuità**, la termografia è anche in grado di rilevare indirettamente tali disomogeneità sulla base della differenza di temperatura in superficie.



# PROVE IN SITU

## Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**)

Lo sclerometro è un dispositivo costituito da **un corpo cilindrico contenente un maglio d'acciaio caricato a molla** che, quando rilasciato, colpisce un **pistone d'acciaio** a contatto con la superficie del calcestruzzo. Tale strumento viene impiegato per stimare la **durezza superficiale** del materiale, rilevata attraverso l'altezza del rimbalzo di una **massa battente** interna allo strumento, la quale a sua volta può essere correlata alla resistenza del materiale stesso. Misurando la capacità del calcestruzzo di resistere alla penetrazione è possibile pertanto ottenere informazioni sulla sua qualità, in particolare sulla resistenza cubica a compressione del conglomerato testato, sul grado di omogeneità delle sue proprietà meccaniche e sulla presenza o meno di aree di scarsa qualità o degradate, non essendo tuttavia la metodologia intesa come sostitutiva della prova a compressione su provini.

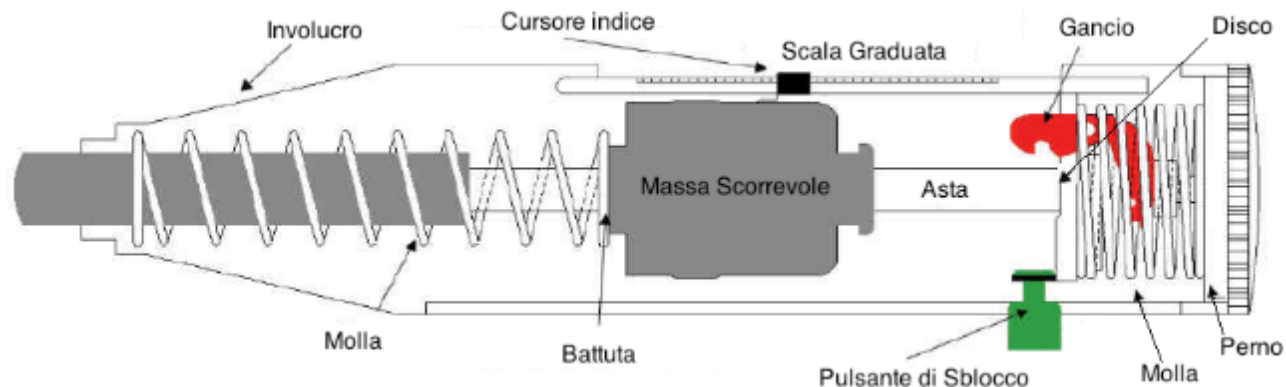
Tale prova rappresenta il metodo più conosciuto e maggiormente utilizzato come prova NDT in situ per la stima delle proprietà meccaniche degli elementi in c.a.

Normativa UNI: Norma UNI-EN 12504-2 31/12/01, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico.

# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): lo strumento

1. In **posizione di riposo**, la molla di base è indeformata e mantiene l'asta fuori dall'involucro che racchiude il meccanismo. Il martello (massa scorrevole) è agganciato al disco a mezzo di un gancio a leva. Anche la molla della punta rimane indeformata.
2. Durante **l'esecuzione della prova**, si pone la punta in contatto con la superficie, la quale rientra a causa della pressione esercitata dall'operatore. La massa viene spostata verso il basso, caricando le molle: quando l'asta tocca il perno, scatta il gancio che mobilita la massa mobile e la proietta contro la battuta (incudine). Tale massa sposta con sé un indice mobile, che permette di eseguire la lettura su una scala graduata da 1 a 100.

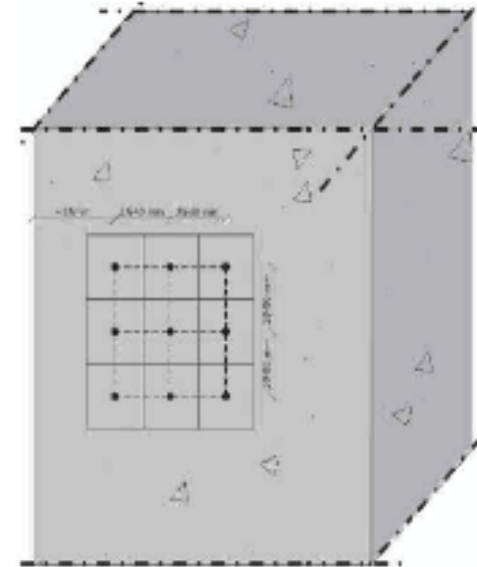




# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): esecuzione di una campagna di prove

1. **Individuazione dell'area di prova:**
  - zona priva di armatura e difetti superficiali;
  - spessore dell'elemento  $\geq 100$  mm;
  - area di influenza 300x300 mm.
2. **Preparazione della superficie:**
  - lisciatura con pietra abrasiva;
  - rimozione residui eventuali acqua.
3. **Taratura** dello strumento sulla propria incudine di riferimento.
4. **Esecuzione** della prova:
  - effettuare almeno **9 misure**;
  - esercitare una pressione sullo strumento posto preferenzialmente perpendicolare alla superficie e registrare l'indice di rimbalzo.



# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): interpretazione dei risultati

L'**indice di rimbalzo N** dell'area sottoposta ad indagine sarà la media aritmetica di almeno 9 valori. Sarà necessario **scartare l'intera serie** di misure qualora più del 20% delle registrazioni si discostino dalla media per più di sei unità. Il giudizio inerente la qualità dei calcestruzzi viene espresso tipicamente secondo la seguente **scala**:

- **calcestruzzi di qualità scadente:  $20 < N < 25$ ;**
- **calcestruzzi di qualità media:  $25 < N < 50$ ;**
- **calcestruzzi di qualità eccellente:  $N < 50$ .**

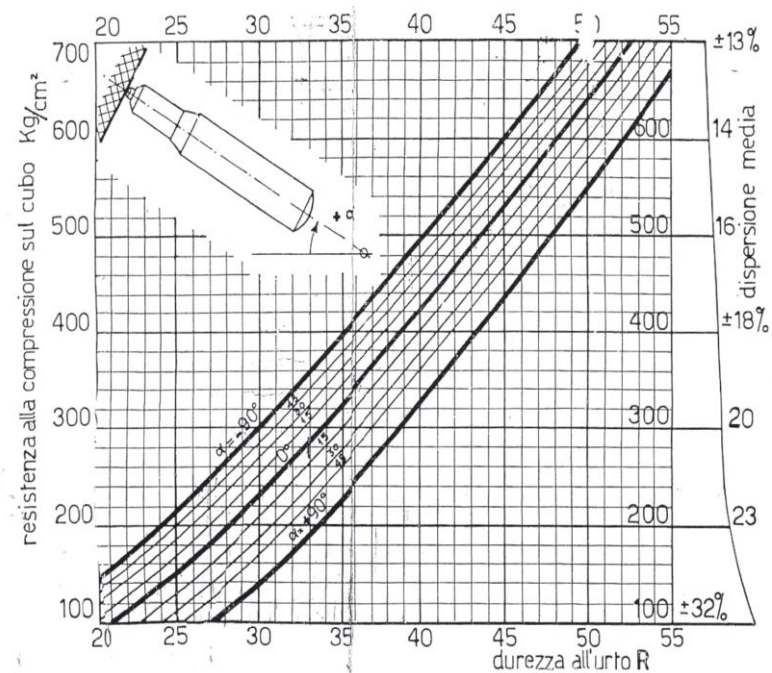
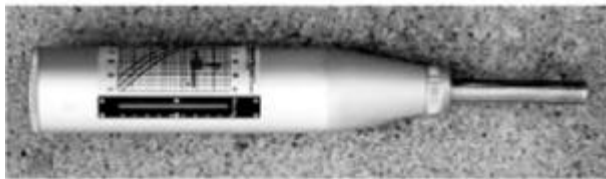
I **fattori** che possono influenzare il valore dell'indice di rimbalzo sono:

- **umidità** (più una superficie è umida, minore sarà il suo indice di rimbalzo);
- **carbonatazione** (aumento dell'indice di rimbalzo);
- **tessitura superficiale** (più è ruvida la superficie, minore sarà l'indice di rimbalzo);
- **l'orientamento** dell'indice rispetto la verticale;
- **l'età** del calcestruzzo;
- dimensione e tipo di **aggregati** utilizzati (incrementa l'indice di rimbalzo se presenti molti inerti grossi).

# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): interpretazione dei risultati

Lo strumento è utilizzabile con angoli rispetto all'orizzontale di  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  o  $+90^\circ$  e fornisce un indice da interpretare utilizzando i grafici forniti dal produttore. **La correlazione NON è valida per le malte da ripristino (SOTTOSTIMA di 2.5 – 3 volte!).**



# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): interpretazione dei risultati

La **stima della resistenza** deve essere condotta applicando un **coefficiente correttivo** che tenga conto che il calcestruzzo testato è diverso da quello utilizzato per la taratura dello strumento stesso.

$$R_{is} = C \cdot R_{cs}$$

resistenza a compressione del  
calcestruzzo in opera

resistenza a compressione del  
calcestruzzo stimata

La stima del valore del coefficiente correttivo può essere condotta tramite la valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo **mediante prova a compressione monoassiale di carote estratte**. La resistenza della carota (cilindrica, con snellezza  $h/d$ ) deve essere **convertita nel valore cubico**, e rapportata a quella stimata tramite l'indice di rimbalzo.

$$C = R_{c,cub,carote} / R_{cs}$$

# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): interpretazione dei risultati

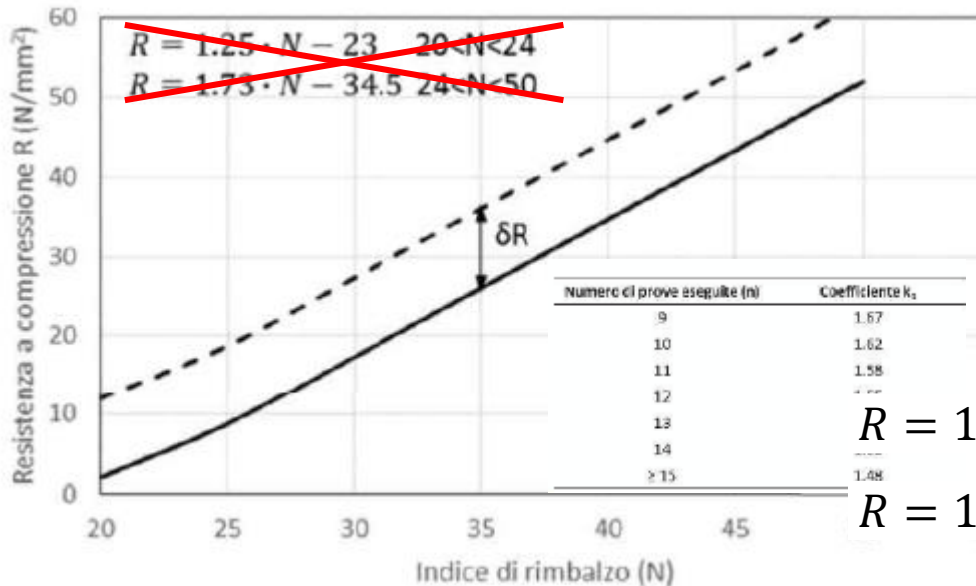
## **Errori di stima:**

- $\approx 10\%$  se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo tramite prova di compressione monoassiale delle carote, ed è nota la composizione del conglomerato cementizio;
- $\approx 15\%$  se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo tramite sola prova di compressione monoassiale delle carote;
- $\approx 20 - 25\%$  se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo solo tramite esecuzione di prova sclerometrica, ma è nota la composizione del conglomerato;
- $> 30\%$  se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo solo tramite esecuzione di prova sclerometrica, ed è ignota la composizione dell'impasto.

# PROVE IN SITU

Prova sclerometrica (**martello di Schmidt**): interpretazione dei risultati

Alternativamente, la norma UNI EN 13971:2008 permette di utilizzare una **curva di base per la correlazione tra l'indice di rimbalzo e la resistenza a compressione**. La curva dovrà essere corretta in funzione della specificità dei risultati ottenuti tramite esecuzione di una prova di compressione monoassiale su carote estratte dall'elemento.



$$\delta R = \delta R_{min} - k_1 \cdot s$$

$$\delta R_{min} = \min(R_{c,cub,carote} - R_{CS});$$

$s$  = scarto quadratico medio;

$k_1$  = coefficiente funzione del numero di prove.

$$R = 1.25 \cdot N - 23 + \delta R \text{ per } 20 < N < 24$$

$$R = 1.73 \cdot N - 34.5 + \delta R \text{ per } 24 < N < 50$$

# PROVE IN SITU

## Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**)

Le prove ultrasoniche sono uno dei metodi di prova NDT più diffusi per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi, ed in particolar modo trovano una **importante applicazione nella caratterizzazione di strutture soggette a degrado**.

La prova consiste nel misurare il tempo impiegato da onde ultrasoniche di adeguata frequenza (**40-120 KHz**) ad attraversare il mezzo oggetto di indagine, tramite due trasduttori collocati ad una distanza nota, ricavandone la **velocità di propagazione**. La prova va eseguita su superfici grezze, prive di intonaco o altro materiale, non in corrispondenza di armature.

Le letture possono essere effettuate in diversi modi (**misure dirette, semi-dirette ed indirette**), legati alla posizione relativa dei due trasduttori. Tale metodo di prova è normato secondo la UNI EN 12504-4:2005: Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.

# PROVE IN SITU

## Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**)

La velocità di propagazione delle onde longitudinali nei solidi è data da:

$$v_c = \sqrt{\frac{(1 - \nu) \cdot E}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}}$$

dove:

$E$  = modulo elastico del solido;

$\nu$  = coefficiente di Poisson del solido;

$\rho$  = densità del solido.

La correlazione fra **velocità dell'onda** e le **proprietà meccaniche** del materiale, permette la stima di queste ultime a partire dalla conoscenza delle prime.

Per tutti i tipi di onde, la velocità di propagazione dipende anche dalla frequenza  $f$  e dalla lunghezza dell'onda  $\lambda$ :

$$v = \lambda \cdot f$$

Maggiore è la  $f$  dello strumento, minore sarà la dimensione del difetto che posso rilevare.

Le onde sonore sono **riflesse da difetti** che hanno dimensioni uguali o maggiori della loro lunghezza d'onda. Dunque, la scelta opportuna di  $\lambda$  e  $f$  permette di individuare i difetti e fessure nel cls.



# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): strumento di prova

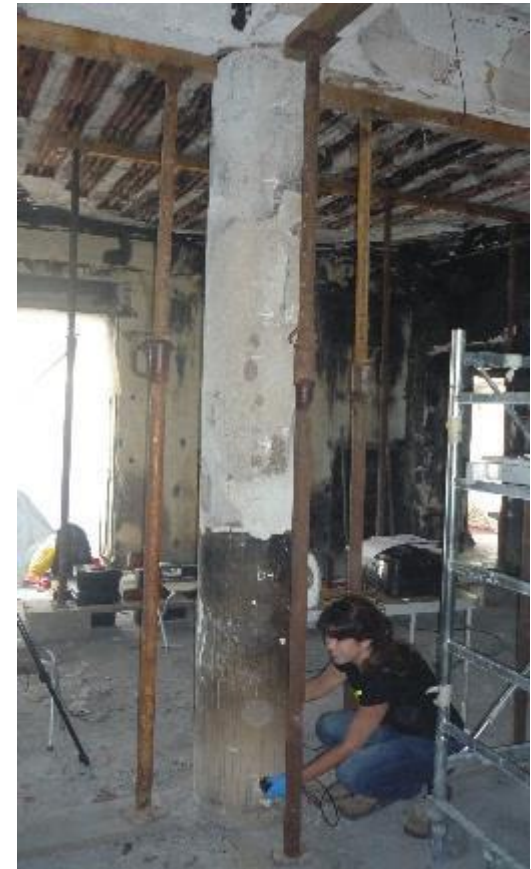


- Generatore di impulsi elettrici;
- Coppia di trasduttori;
- Barra di calibrazione;
- Amplificatore e dispositivo di registrazione.

# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): esecuzione di una prova

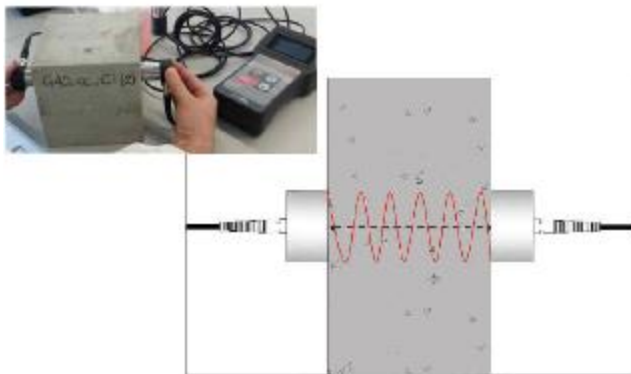
- 1. Individuazione e preparazione dell'area di prova:**
  - lisciatura della superficie con pietra abrasiva;
  - applicazione di un sottile strato di materiale viscoso trasduttore;
- 2. Posizionamento dei trasduttori:**
  - prova diretta;
  - semi-diretta;
  - indiretta;
- 3. Esecuzione della prova:**
  - emissione dell'impulso ultra-sonico;
  - rilevazione del tempo di transito;
  - calcolo della velocità  $v$ .



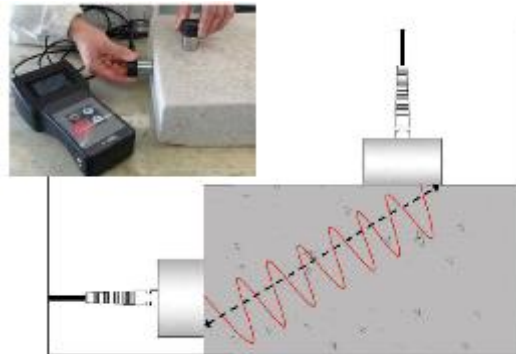
# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): metodi di prova

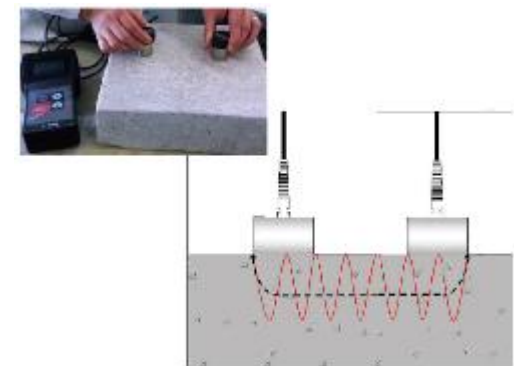
Prova diretta:



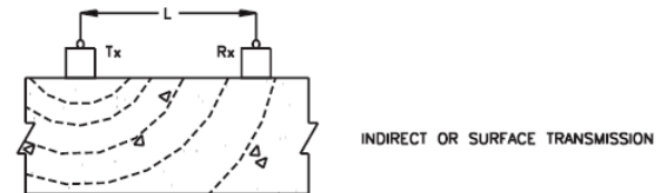
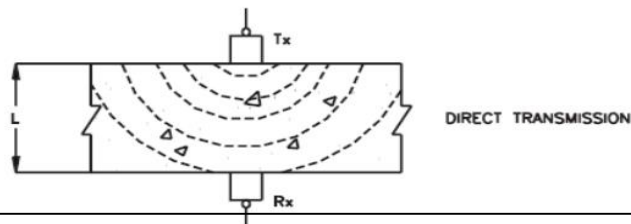
Prova semi-diretta:



Prova indiretta:



Tx = TRANSMITTER  
Rx = RECEIVER



# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): interpretazione dei risultati

I valori della velocità misurati possono essere influenzati da:

- **umidità** residua del calcestruzzo (la presenza di acqua nei pori della matrice favorisce la trasmissione delle onde, che quindi avviene con maggiore velocità);
- dimensione e tipo di **aggregati** (v maggiore con aggregati di dimensioni grandi e molto rigidi. nb: questo non implica necessariamente che lo sia anche la resistenza a compressione!)
- presenza di **armature** metalliche;
- **difetti** macroscopici;
- presenza di **vuoti e fessure**.

Velocità di attenuazione	Qualità del conglomerato
>4.0 km/s	Da molto buona a eccellente
3.5 – 4.0 km/s	Da buona a molto buona
3.0 – 3.5 km/s	Sufficiente, ma sono sospetti alcuni danni localizzati
<3.0 km/s	Cattiva, con perdita di integrità della matrice cementizia
<2.0 km/s	Totalmente insufficiente

normativa UNI EN 13791

# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): interpretazione dei risultati

Come nel caso delle curve sclerometriche, anche in questo caso la **curva base di correlazione** fra velocità e resistenza a compressione può essere corretta sulla base del valore di resistenza a compressione misurato partendo da prove di compressione monoassiale su carote di cls estratto dall'elemento oggetto di indagine.

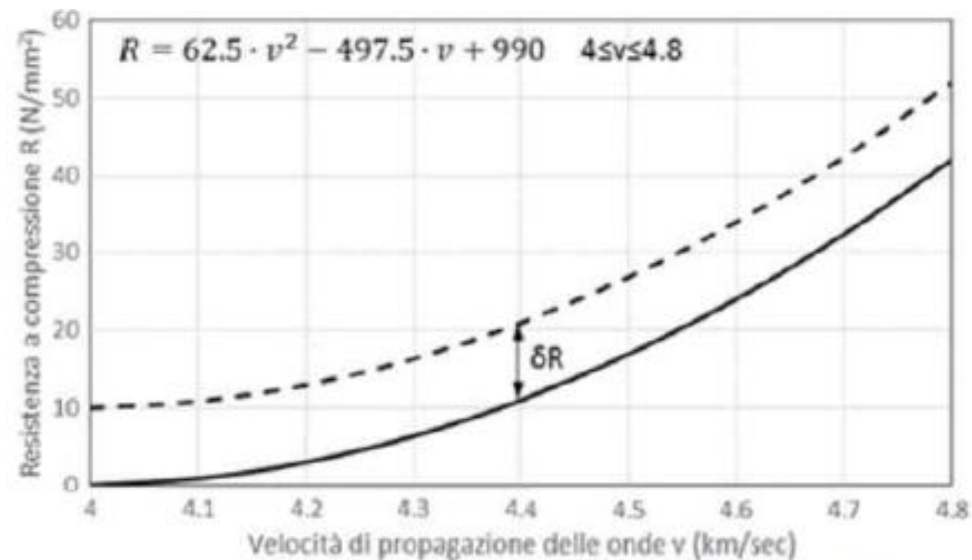
$$\delta R = \delta R_{min} - k_1 \cdot s$$

$$\delta R_{min} = \min(R_{c,cub,carote} - R_{cs});$$

$s$  = scarto quadratico medio;

$k_1$  = coefficiente funzione del numero di prove.

Numero di prove eseguite (n)	Coefficiente $k_1$
9	1.67
10	1.62
11	1.58
12	1.55
13	1.52
14	1.50
≥ 15	1.48



# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): interpretazione dei risultati

Errori di stima:

≈ 12-15% se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo tramite prova di compressione monoassiale delle carote, ed è nota la composizione del conglomerato cementizio (dimensione e tipo aggregati);

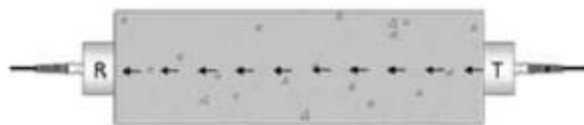
≈ 15-18% se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo tramite sola prova di compressione monoassiale delle carote;

≈ 20 – 25% se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo solo tramite esecuzione di prova ultrasonica, ma è nota la composizione del conglomerato;

> 30% se viene determinata la resistenza a compressione del calcestruzzo solo tramite esecuzione di prova ultrasonica ed è ignota la composizione dell'impasto.

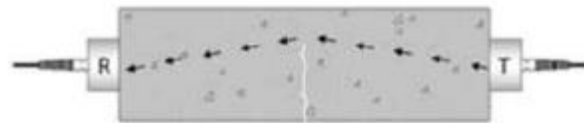
# PROVE IN SITU

## Prova ultrasonica (velocità onde UPV): identificazione delle fessure



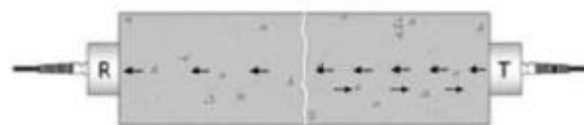
### CALCESTRUZZO INTEGRO

Le onde ultrasoniche si propagano in un tempo  $t_0$  percorrendo la via più breve tra T ad R (distanza L) con una velocità  $v_0 = L/t_0$



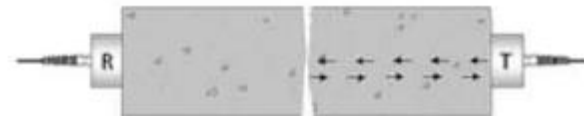
### FESSURE SUPERFICIALI

Le onde ultrasoniche si propagano in un tempo  $t_1$  ( $t_1 > t_0$ ) intorno alla fessura con una velocità:  $v_1 < v_0$



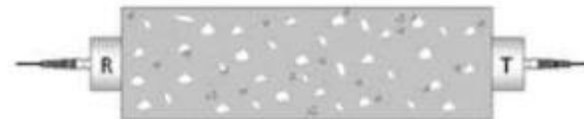
### MICROFESSURA PASSANTE

Le onde ultrasoniche sono in parte riflesse e in parte si propagano riducendo notevolmente l'ampiezza del segnale e aumentando il tempo  $t_0$



### FESSURA PASSANTE

Le onde ultrasoniche sono completamente riflesse. Nessun segnale viene registrato.



### VUOTI E MICROFESSURAZIONI

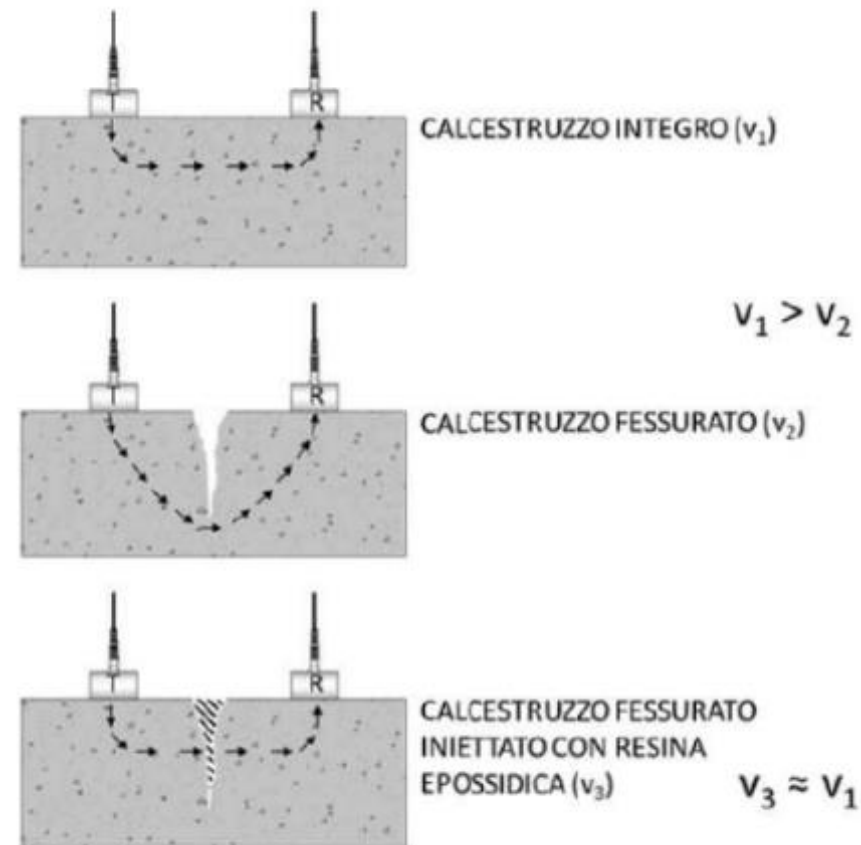
Le onde ultrasoniche possono propagarsi attorno o attraverso (nel caso in cui siano riempiti d'acqua) i vuoti e le microfessurazioni con un aumento del tempo  $t_0$

# PROVE IN SITU

Prova ultrasonica (**velocità onde UPV**): identificazione delle fessure

In presenza di **fessure superficiali**, l'incremento del tempo di propagazione rispetto a quello misurato nella prima misurazione (zona senza difetti), è proporzionale alla profondità della lesione.

Tecnica utilizzata nello specifico per **verificare che la sigillatura** (mediante sistemi epossidici) di una lesione sia stata condotta **correttamente**.





# PROVE IN SITU

## Metodo **SONREB**

Metodo combinato per la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in base alla determinazione di almeno due parametri che misurino grandezze fisiche del conglomerato cementizio completamente differenti fra di loro. I parametri sono la velocità di propagazione delle onde sonore (**SONic**) e l'indice di rimbalzo (**REBound**).

L'indice di rimbalzo è influenzato principalmente dalla durezza della superficie del materiale e dunque è riferito alle proprietà della **parte corticale** dell'elemento, invece la velocità di propagazione delle onde ultrasoniche è maggiormente legata alle proprietà **della parte "interna" del materiale** e dai difetti interni, che poco influenzano la misura effettuata con lo sclerometro.

Bisogna però porre attenzione, perché se il metodo viene impiegato "casualmente", esso può condurre ad errori macroscopici, addirittura superiori a quelli ottenibili utilizzando i singoli metodi separatamente.

# PROVE IN SITU

## Metodo **SONREB**

Le principali formule di correlazione delle due misure sono:

$$R_{c,SONREB} = t \cdot N + Dv^n - E$$

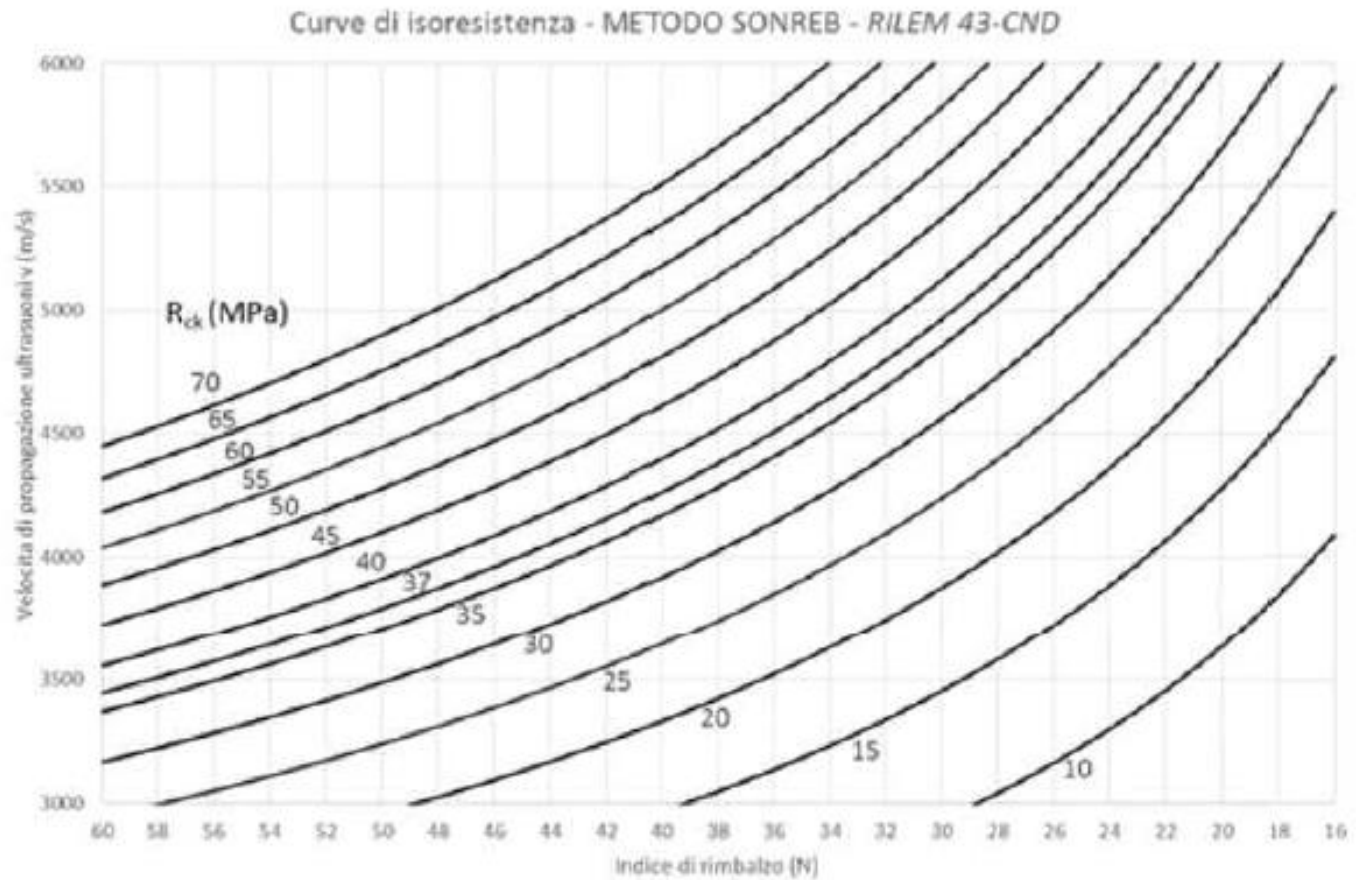
$$R_{c,SONREB} = F \cdot N^G \cdot v^H$$

dove i fattori  $t$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $G$  e  $H$  dipendono dall'età e dal tipo di calcestruzzo utilizzato nella sperimentazione dalla quale sono state ottenute le formule.

Esistono anche delle curve sperimentali → RILEM 43-CND.

# PROVE IN SITU

## Metodo **SONREB**



# PROVE IN SITU

## Prove di **pull-out**

Prova che consiste nella misura della **forza di estrazione di un tassello inserito nel calcestruzzo**. Tali tasselli possono essere pre-inseriti (annegati nel getto, per controllo di qualità) o post-installati, per la valutazione della resistenza meccanica del calcestruzzo.

La strumentazione di prova è composta da:

- martinetto oleodinamico;
- pompa manuale dotata di manometro;
- trapano a testa snodabile;
- tassello metallico ad espansione.



L'indagine pull-out è una prova semi-distruttiva (arrecata un danno limitato all'elemento di calcestruzzo: diametro 55 mm, profondità 25mm), normata dalla UNI EN 12504-3:2005 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione".

# PROVE IN SITU

## Prove di **pull-out**

La prova si basa sulla **corrispondenza** esistente tra il carico unitario di rottura a compressione del calcestruzzo e la forza necessaria ad estrarre un inserto metallico standardizzato pre-inglobato nel calcestruzzo fresco o post inserito nel calcestruzzo indurito.

Esempi utilizzo:

- stimare la resistenza in sito;
- stabilire quando procedere al post-tensionamento;
- stabilire quando rimuovere forme e puntelli;
- stabilire quando interrompere la protezione invernale e la manutenzione;
- per effettuare prove comparative.

**La forza di estrazione è rappresentativa di uno stato di sollecitazione complesso, ma il suo valore è correlabile con la resistenza a compressione.**

# PROVE IN SITU

Prove di **pull-out**: procedura di prova

1. **Individuazione dell'area di prova:**

- indagine pacometrica preliminare per rilievo presenza ferri d'armatura;
- evitare zone irregolari, con presenza di aggregati affioranti;

2. **Preparazione area di prova:**

- realizzazione di un **foro** nel cls tramite trapano con testa snodabile, ortogonale rispetto la superficie. La testa del trapano deve essere provvista di un terminale di forma tronco-conica;
- pulizia del foro con aria compressa;

3. **Inserimento del tassello ad espansione per tutta la lunghezza del foro;**

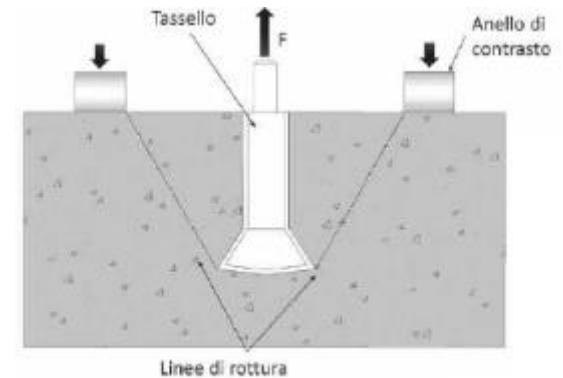


# PROVE IN SITU

Prove di **pull-out**: procedura di prova

## 4. Esecuzione della prova:

- posizionamento e fissaggio del martinetto;
- incremento della pressione nel martinetto con rampa graduale e costante;
- rilievo della forza di estrazione.



# PROVE IN SITU

## Prove di **pull-out**: interpretazione risultati

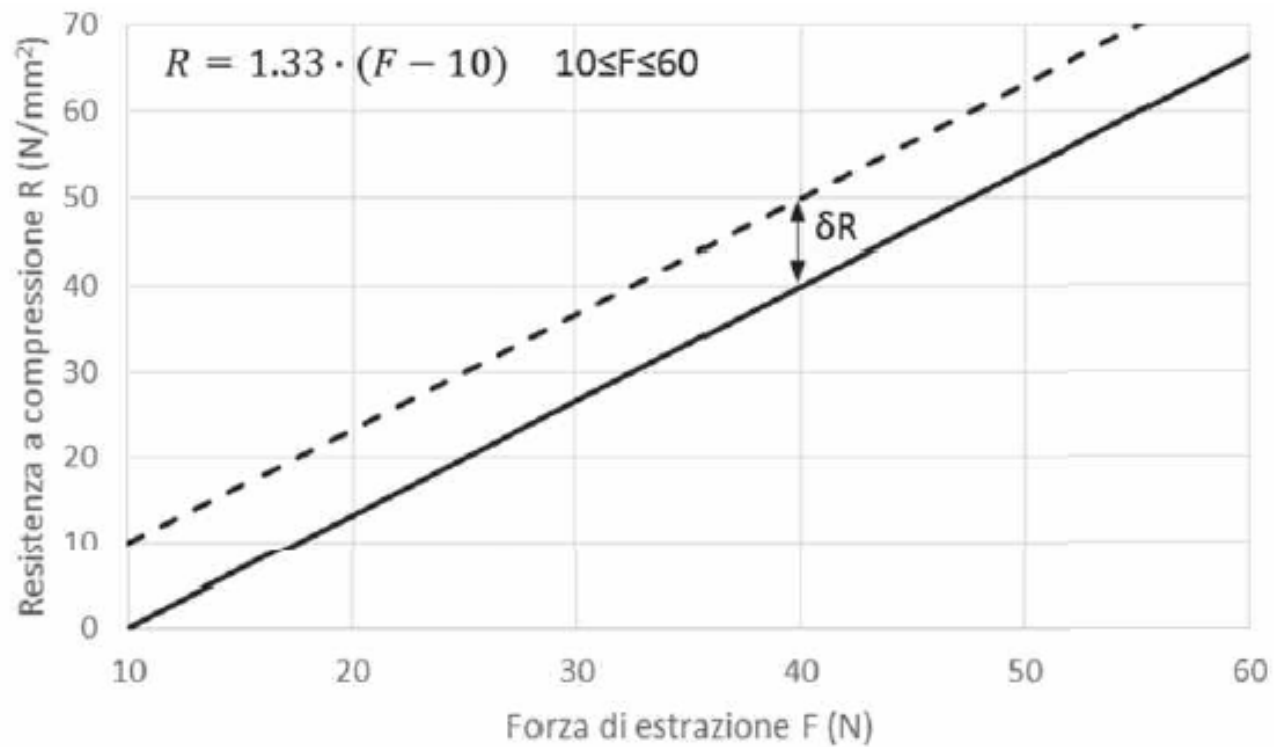
Devono presentarsi **almeno 3 risultati accettabili**. Qualora un dato si discosti più del 20% dal valore medio delle forze di estrazione registrate, esso dovrà essere scartato a favore di un'ulteriore prova da eseguirsi in prossimità delle altre. Il valore della forza di estrazione ottenuta è direttamente correlabile alla forza di **resistenza a trazione**, che corrisponde circa al 10-15% di quella a compressione.

Dalla pressione che viene letta sul manometro ci si riconduce, tramite la curva di taratura del martinetto, alla forza di estrazione, e conseguentemente al valore di resistenza a compressione mediante la **curva base** riportata nella norma UNI 13791:2008. Tale curva deve essere poi tarata in base al valore di resistenza a compressione ottenuta sulla base di prove a compressione effettuate su carote estratte dall'elemento.



# PROVE IN SITU

Prove di **pull-out**: interpretazione risultati

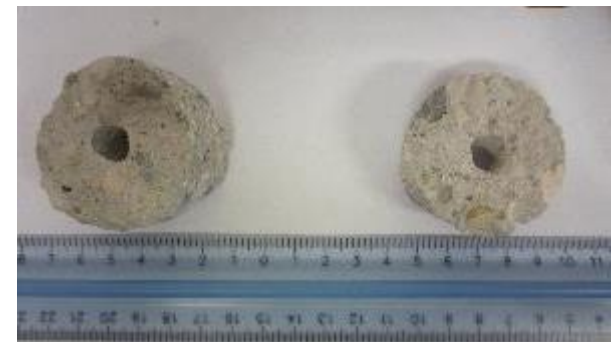


# PROVE IN SITU

## Carotaggi

L'esecuzione di carotaggi (**prova distruttiva**) permette di ottenere dei campioni di calcestruzzo direttamente dall'elemento oggetto di analisi, al fine di calibrare le curve di correlazione fra alcune grandezze misurate sperimentalmente tramite prove NDT, e la **resistenza a compressione monoassiale**. Ulteriormente, tali campioni possono essere oggetto di ulteriori prove, ad esempio per verificare lo stato di **carbonatazione**, di **penetrazione di cloruri**, di **degrado** in genere dell'elemento, così come determinarne le **caratteristiche chimiche e morfologiche**.

Un'ulteriore applicazione si può ad esempio ritrovare nella valutazione dell'**indice colorimetrico** di calcestruzzi sottoposti **alle alte temperature**.



# PROVE IN SITU

## Carotaggi

I criteri e modalità di prelievo sono normati dalla UNI EN 12504-1:2002 e dalla UNI 6131:2002.

- Per la valutazione delle proprietà meccaniche ed elastiche:

$$d \geq 3 \cdot D_{max}$$

- **Quantità** (sempre e comunque almeno 3 carote di diametro 100 mm):
  - Per  $V_{cls} < 50 \text{ m}^3$ : consigliato almeno 7 carote di diametro 100 mm;
  - Per  $V_{cls} \geq 50 \text{ m}^3$ : consigliato almeno 7 carote di diametro 100 mm + 3 ogni 50  $\text{m}^3$ ;
- **Diametro**: sempre almeno 100 mm, tranne nei casi nei quali sia comprovata l'impossibilità di prelievi di tali dimensioni (peggiore dispersione risultati). La snellezza deve essere pari almeno a 2.
  - se  $d = 50 \text{ mm}$ : il numero minimo di carote diventa 9  $\text{m}^3$ ;
  - se  $d = 75 \text{ mm}$ : il numero minimo di carote diventa 6  $\text{m}^3$ .

# PROVE IN SITU

Carotaggi: esempio di procedura di esecuzione (in situ)

1. Individuazione **dell'area di prova**:
  - indagine pacometrica preliminare per rilievo presenza ferri d'armatura;
2. **Fissare il carotiere** all'area di prova;
3. **Estrazione della carota** e identificazione per la consegna al laboratorio di prova.



# PROVE IN SITU

Carotaggi: esempio di procedura di esecuzione (in laboratorio)

1. Analisi visiva delle carote;
2. Misura lunghezza e diametro;
3. Pesatura;
4. Rettifica delle superfici a contatto con la pressa;
5. Esecuzione di prova di compressione monoassiale secondo UNI EN 12390-3.



$$R_{c,misurata} \neq R_{c,in\ opera}$$

# PROVE IN SITU

Carotaggi: interpretazione dei risultati

I **parametri** che possono influenzare il valore di resistenza a compressione:

- Diametro e snellezza della carota;
- Posizione dei carotaggi;
- Modalità di conservazione dei provini prima dell'esecuzione della prova di compressione;
- Presenza di ferri di armatura nell'area di prova;
- Direzione del carotaggio rispetto la direzione del getto;
- Età della carota al momento dell'esecuzione della prova di compressione;
- Temperatura e umidità di conservazione del calcestruzzo;
- Effetto «tormento» derivante dall'azione del carotiere.

# PROVE IN SITU

Carotaggi: interpretazione dei risultati

Esistono varie metodologie per correlare la resistenza a compressione misurata sulle carote rispetto la resistenza a compressione del calcestruzzo in situ. Tra di essi:

- Metodo British Standard 1881-120:1983;
- Metodo ACI 214.4R-03 (2003);
- **Metodo HOLOS Coppola-Buoso (2009).**

$$R_{cm,in\ opera} = F_{dia} \cdot F_{\frac{h}{d}} \cdot F_{mc} \cdot F_{Fe} \cdot F_{Tor} \cdot F_{dir} \cdot F_t \cdot F_T \cdot f_{c,carote} \geq 0.85 R_{cm,progetto}$$

Snellezza/  
diametro

Presenza  
ferri

Direzione  
prelievo

Temperatura

Conservazione  
carote

Effetto  
Tormento

Tempo  
prelievo

**Limite accettazione  
per NTC2008**

# PROVE IN SITU

Carotaggi: interpretazione dei risultati

**Fattore di snellezza**

$$F_h = \frac{h}{d}$$

h/d	0.5	0.75	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00
$f_{c-carota}$							
15 ÷ 20	0.66	0.83	1.00	1.10	1.20	1.27	1.32
21 ÷ 35	0.70	0.84	1.00	1.06	1.16	1.18	1.22
36 ÷ 50	0.75	0.89	1.00	1.04	1.08	1.10	1.12

**Fattore di presenza ferri d'armatura**

$$F_{Fe} = 1 + \left( 1,5 \cdot \frac{\Phi_r}{d} \cdot \frac{l}{h} \right)$$

**Fattore di «tormento»**

$F_{Tor}$	1,15	1,12	1,10	1,07	1,05	1,02	1,00
$f_{c-carota}$ (N/mm <sup>2</sup> )	10-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40	> 40

**Fattore di direzione carotaggio**

Direzione carotaggio vs getto	PARALLELA	PERPENDICOLARE		
POSIZIONE CAROTAGGIO	-	0 ÷ 1/3h	1/3h ÷ 2/3h	2/3h ÷ h
$F_{Dir}$	1,0	1,05	1,075	1,10



# PROVE IN SITU

Carotaggi: interpretazione dei risultati

- Approccio **A - statistico** – applicabile se sono stati effettuati più di 15 carotaggi. Il valore della resistenza caratteristica in opera è il minimo tra:

$$R_{ck,in\ opera} = R_{cm,in\ opera} - 1.48 \cdot s_n \quad R_{ck,in\ opera} = R_{cm,in\ opera} + 4\ MPa$$

Dove  $s_n$  è lo scarto quadratico medio, che deve essere assunto almeno pari a 2.

- Approccio **B - forfetario**: Il valore della resistenza caratteristica in opera è il minimo tra:

$$R_{ck,in\ opera} = R_{cm,in\ opera} - k$$

$$R_{ck,in\ opera} = R_{cm,in\ opera} + 4\ MPa$$

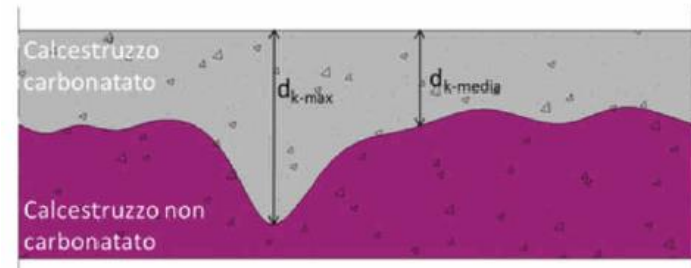
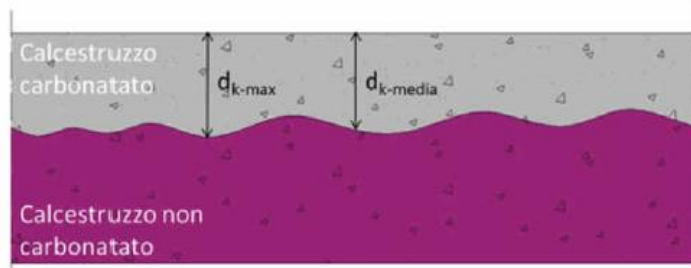
N° prelievi	Valore K
3 ÷ 6	7
7 ÷ 9	6
10 ÷ 14	5

# PROVE IN SITU

## Prove colorimetriche

Prove utilizzate per individuare lo **stato di degrado del calcestruzzo**. Per ogni materiale, un particolare **reagente** viene spruzzato sulla superficie laterale di una carota estratta da un elemento, su un frammento di materiale estratto o su un campione che sia comunque rappresentabile dell'elemento oggetto di indagine. Il reagente provoca una variazione di colore che identifica da una parte il materiale affetto da degrado, e da un altro quello ancora privo di contaminazione. Es: carbonatazione, cloruri, solfati.

Es. per carbonatazione: il reagente è una soluzione di fenoftaleina all'1% in alcool etilico. La soluzione funge da indicatore di pH: il **cls si colora di viola dove il pH è molto basico** (superiore a 12-12.5), mentre rimane incolore dove il pH scende a valori inferiori a 11. Questa zona è quella che viene considerata interessata dal fenomeno di carbonatazione.



# PROVE IN SITU

## Mappatura potenziale (HCP)

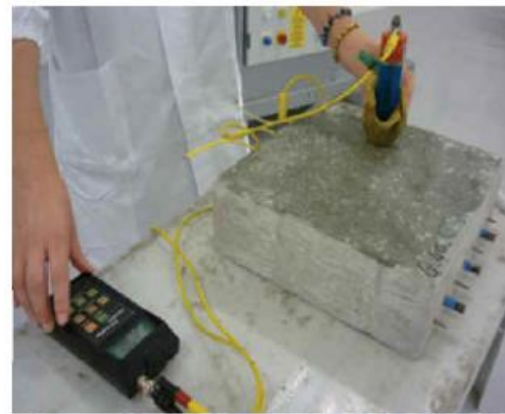
La mappatura del **potenziale di corrosione libera** è detta anche potenziale di semi-cella, ed ha il fine di valutare la **corrosione** delle armature in acciaio al carbonio nelle strutture in c.a.

Si collega una barra d'armatura al polo positivo di un **voltmetro ad elevata impedenza**, mentre al polo negativo si collega un **elettrodo di riferimento** (tipicamente Cu/CuSO<sub>4</sub> o CSE). La misura del potenziale permette di identificare se la barra si trovi in uno stato di passività (velocità di corrosione trascurabile) o meno. Non viene data alcuna informazione sulla velocità di corrosione.

La strumentazione è composta da:

- Elettrodo di riferimento;
- Voltmetro;
- Spugna.

Norma di riferimento: UNI 10174: 1993.



# PROVE IN SITU

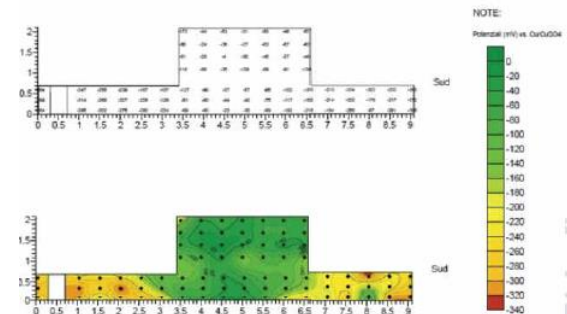
## Mappatura potenziale (HCP)

Il valore del potenziale di corrosione libera di ferri anegati in strutture aeree si attesta solitamente tra valori di -150 – 50 mV vs CSE nel caso di armature che si trovano in stato di passività anegate in calcestruzzi non carbonatati, privi di cloruri e non fessurati.

Un altro riferimento normativo è la ASTM C876:

- Probabilità di corrosione **inferiore al 10%**: potenziali meno negativi di -200 mV vs CSE;
- Probabilità di corrosione **maggiore del 90%**: potenziali più negativi di -350 mV vs CSE;
- **Zona di incertezza**: tra -250 e -350 mV vs CSE.

Generalmente questa misura viene condotta su più punti dell'elemento/struttura oggetto di indagine, in modo tale da creare una vera e propria mappatura del potenziale libero di corrosione.



# PROVE IN LABORATORIO

## Analisi chimica elementare

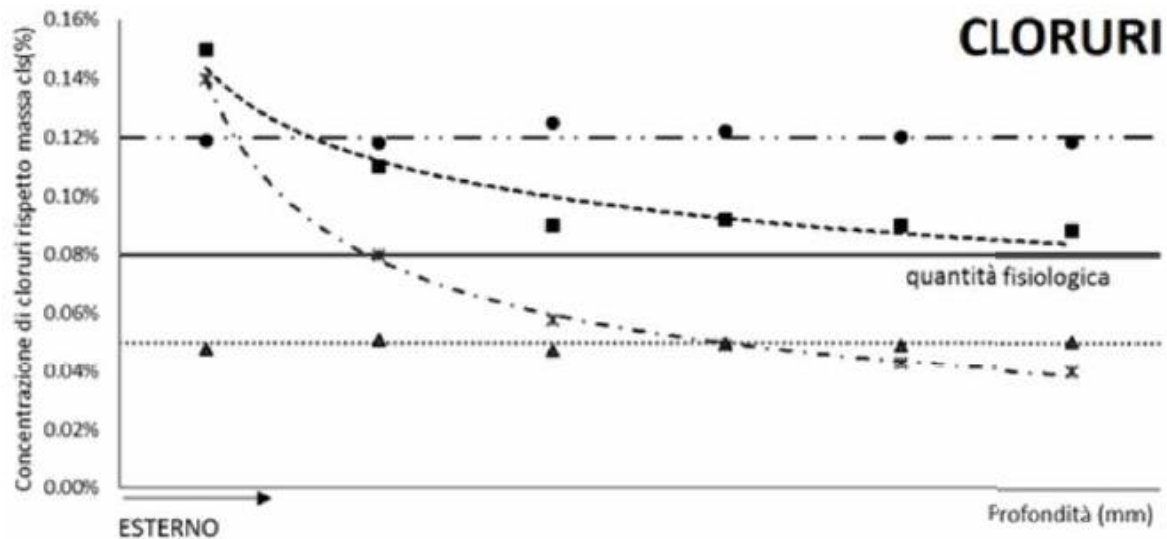
L'analisi chimica di un campione di calcestruzzo, malta o altro materiale da costruzione può avvenire per via **qualitativa** (riconosce i costituenti che lo compongono) o **quantitativa** (riconosce le percentuali di costituenti). Tale analisi può essere condotta tramite vari metodi, su campioni secchi o umidi, sia per estrazione di un componente di interesse (metodo di titrazione + titolazione), sia mediante metodi strumentali, tra i quali:

- X-Ray Fluorescence;
- Inductive Coupled Plasma;
- Cromatografia liquida;
- Gas cromatografia di massa

Elementi da analizzare: **cloruri, solfati, alcali.**

# PROVE IN LABORATORIO

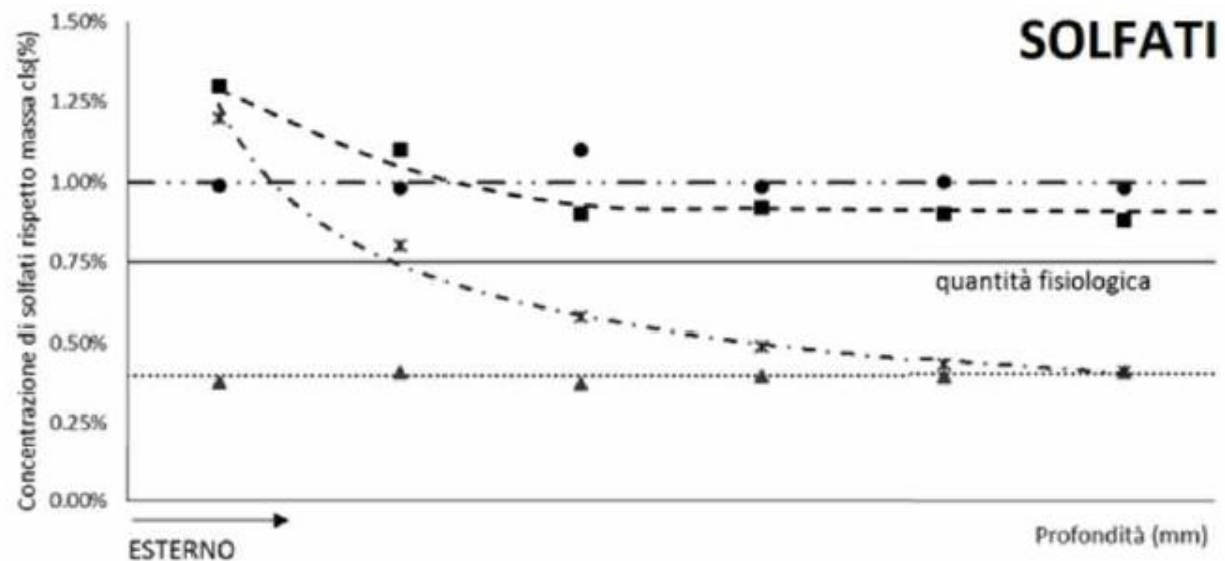
## Analisi chimica elementare



- ▲ Concentrazione costante ma non pericolosa poiché il cloruro presente corrisponde a quello fisiologico apportato nel calcestruzzo dagli ingredienti utilizzati per il suo confezionamento
- Concentrazione costante ma pericolosa, cloruro introdotto erroneamente nell'impasto attraverso gli ingredienti
- Cloruri provenienti dall'ambiente esterno, ma anche erroneamente introdotti nell'impasto (sempre sopra alla quantità fisiologica)
- ✕ Cloruri provenienti dall'ambiente esterno con profilo decrescente negli strati più interni

# PROVE IN LABORATORIO

## Analisi chimica elementare



- ▲ Concentrazione costante ma non pericolosa
- Concentrazione costante ma pericolosa, solfati introdotti erroneamente nell'impasto attraverso gli ingredienti
- Solfati provenienti dall'ambiente esterno, ma anche erroneamente introdotti nell'impasto (sempre sopra alla quantità fisiologica)
- x Solfati provenienti dall'ambiente esterno con profilo decrescente negli strati più interni

# PROVE IN LABORATORIO

## Diffrazione a raggi X

La diffrazione a raggi X si basa sul fenomeno della diffrazione che si realizza quando un **raggio di tipo X colpisce il reticolo cristallino di un solido**. La legge che governa la diffrazione è nota come equazione di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

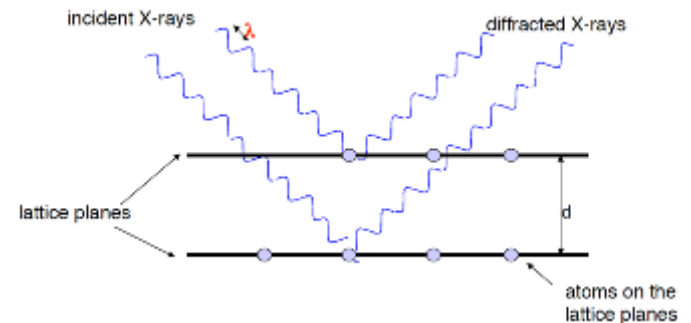
$n$  è il fattore di molteplicità (un numero intero);

$\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione incidente;

$\theta$  è l'angolo di diffrazione;

$d$  è la distanza inter-planare fra due piani reticolari adiacenti.

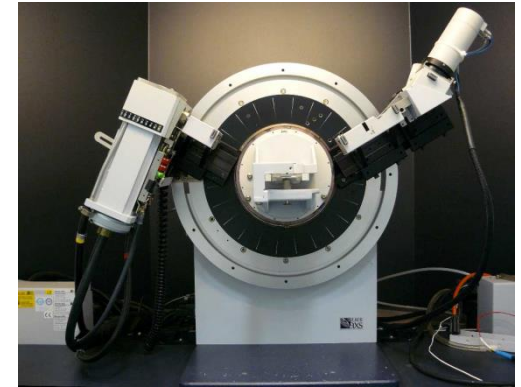
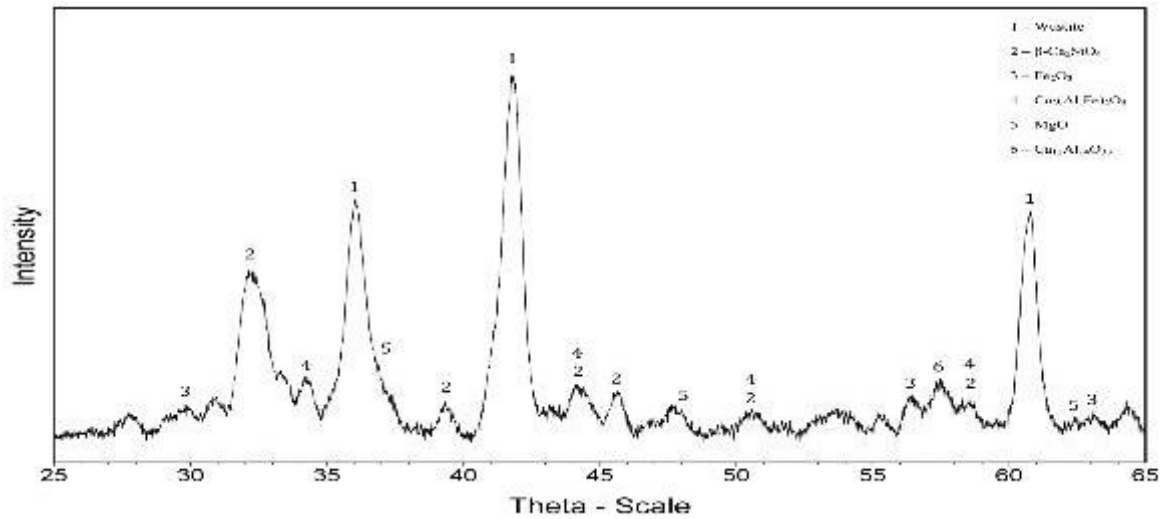
Gli strumenti consentono di registrare l'intensità dei raggi diffratti ai diversi angoli quando un materiale viene irradiato con i raggi X, ottenendo come risultato uno spettro tipico del materiale oggetto di indagine.





# PROVE IN LABORATORIO

## Diffrazione a raggi X



# PROVE IN LABORATORIO

## Microscopia

La microscopia ottica è un utile strumento di indagine, che consente di ingrandire il campione oggetto di analisi fino a 1000 volte. Serve tipicamente per indagare alcune caratteristiche di tipo macroscopico del campione oggetto di indagine, ad esempio il quadro fessurativo, la presenza di porosità, la morfologia.

Per ottenere ingrandimenti maggiori, si utilizza invece la microscopia a scansione (SEM), che consente di arrivare ad analizzare i campioni fino all'ordine di  $\mu\text{m}$ .

**SEM:** Scanning Electron Microscope

**SE — SEM:** Secondary Electron mode — SEM

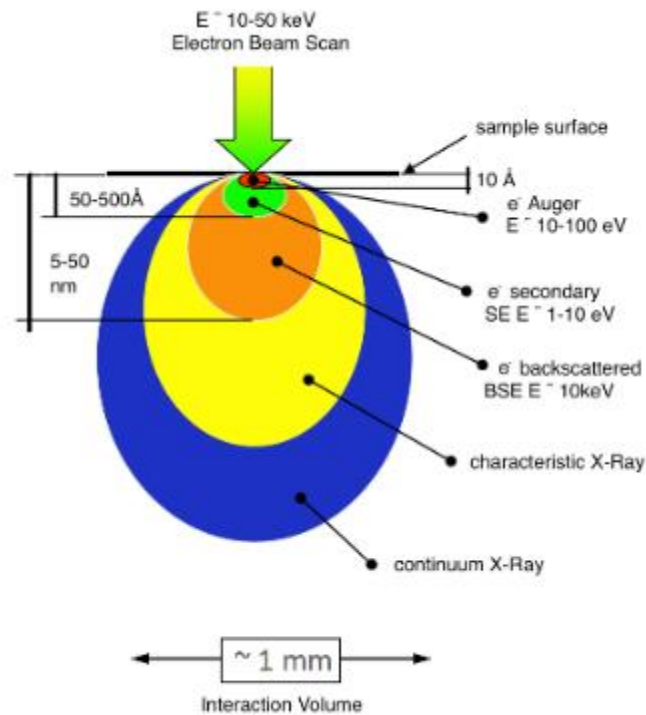
**BSE — SEM:** Back Scattered Electron model - SEM

**EDS — SEM:** Energy Dispersive X-Ray Microanalysis

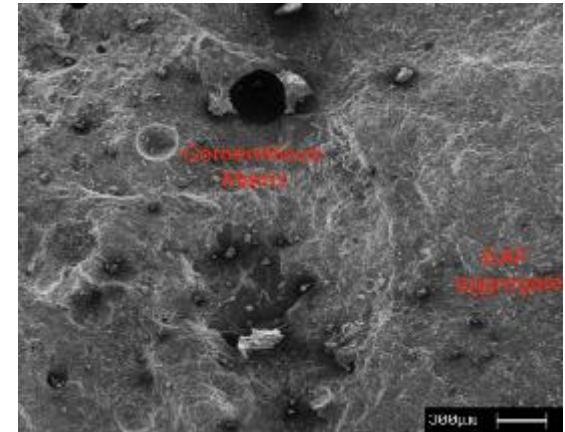


# PROVE IN LABORATORIO

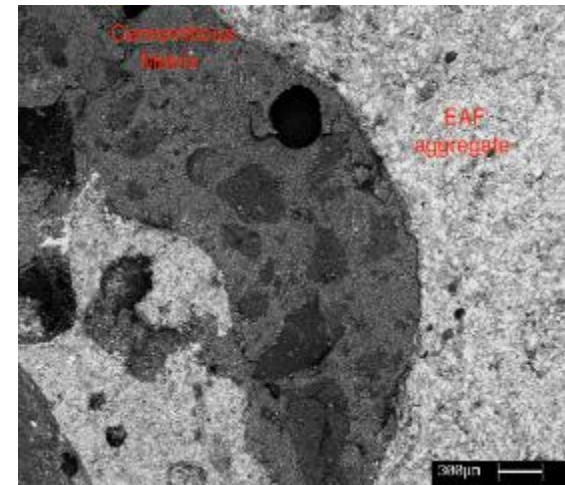
## Microscopia



### SE – SEM



### BSE – SEM



# PROVE IN LABORATORIO

## Analisi termiche

Sono analisi che consentono di misurare la variazione di alcune proprietà dei materiali qualora sottoposti a **cicli termici programmati**. In particolare, una prova tipica che può essere condotta riguarda la perdita di peso, che permette di condurre le **analisi termogravimetriche (TG)**.

Si possono anche analizzare le variazioni entalpiche correlate al passaggio di fase e alle trasformazioni chimiche subite dal materiale durante il ciclo termico, mediante le **analisi termiche differenziali (DTA)**. Tale prova è condotta misurando la variazione di temperatura di un campione rispetto ad un riferimento.

Inoltre, la **calorimetria differenziale a scansione (DSC)** misura il flusso di energia necessario per mantenere il campione alla stessa temperatura del riferimento.



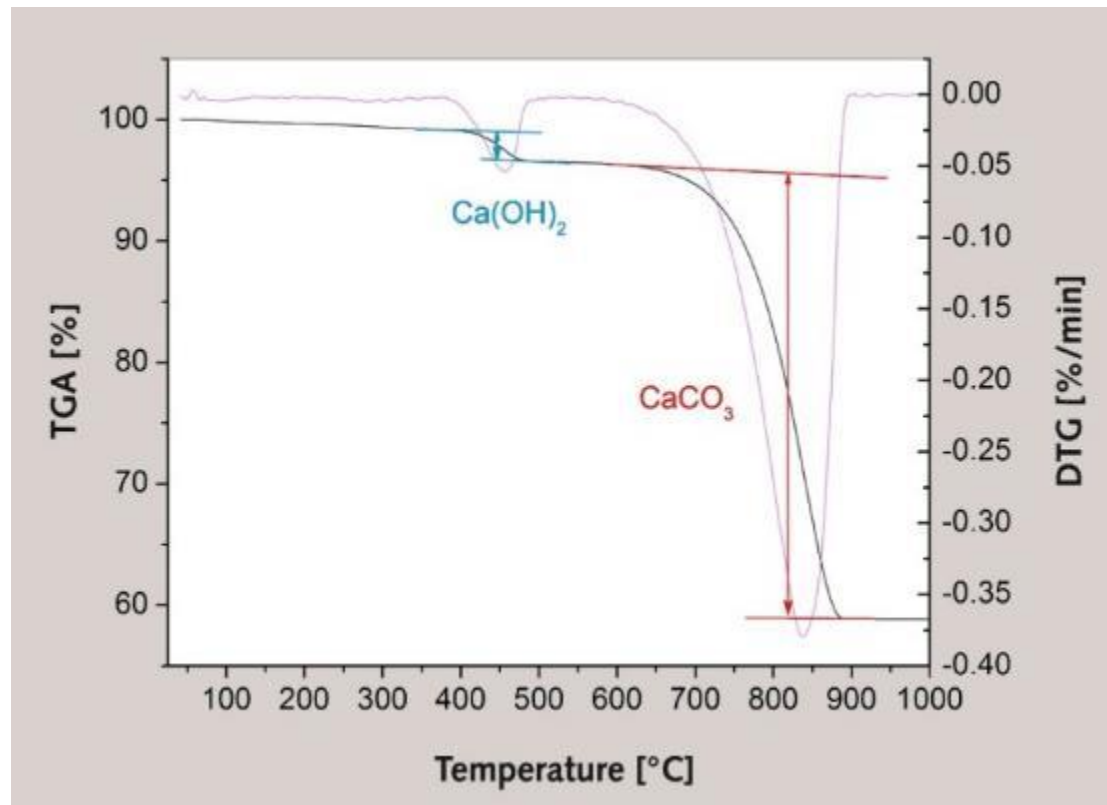
# PROVE IN LABORATORIO

## Analisi termiche

temperatura T°C	trasformazioni chimico-fisiche	colorazione	resistenza
< 95 - 100	Emissione di H <sub>2</sub> O sotto forma di vapore. Possibili fenomeni esplosivi (steam boiler effect)	inalterata	inalterata
60 - 135	Decomposizione e disidratazione dell'ettringite	inalterata	inalterata
135-350	Disidratazione del gel di silicato idrato	lieve colorazione rosa	modesta riduzione
350-450	Disidratazione dell'idrossido di calcio	rosa/rosso	progressiva riduzione della resistenza
573	Trasformazione del quarzo (da forma $\alpha$ a $\beta$ )	rosa/rosso	disgregazione dell'aggregato calcareo
700-900	Decomposizione del carbonato di calcio	grigio chiaro	molto ridotta
900-1200	Decomposizione del carbonato di calcio	marrone	praticamente nulla

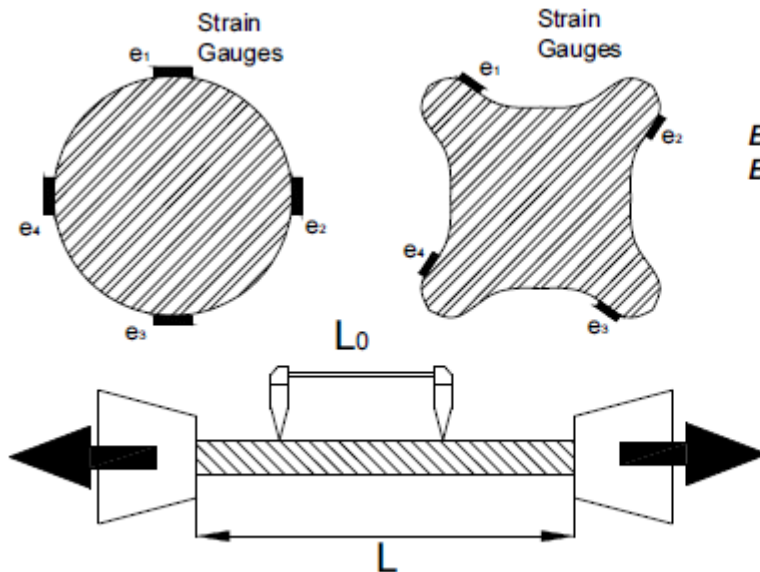
# PROVE IN LABORATORIO

Analisi termiche



# BARRE D'ARMATURA

- ESTRAZIONE DI BARRE IN ACCIAIO DAGLI ELEMENTI STRUTTURALI (gen. Pilastri in corrispondenza dei ferri di ripresa);
- ESECUZIONE DI PROVE DI TRAZIONE (la lunghezza dello spezzone estratto deve essere sufficiente) secondo le prescrizioni della UNI 6892:2009.



*Barre tonde lisce (o nervate)  
Barre tipo RUMI (sezione quadrata)*

*Posizionamento della barra tra le  
ganasce della macchina di trazione*

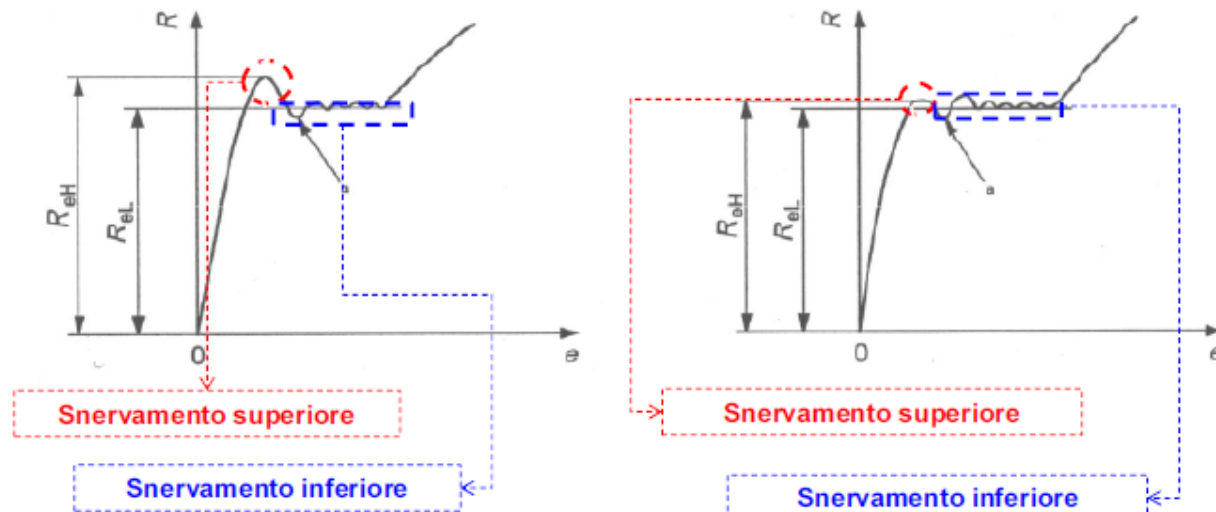
$$L_0 = \max \{ 5 \cdot \phi_{\text{rebar}}; 100\text{mm} \}$$

*(lunghezza di riferimento)*

# BARRE D'ARMATURA

## Curve tensione-deformazione

DEFINIZIONE TENSIONE di SNERVAMENTO per DIVERSE CURVE (snervamento definito)



**Snervamento superiore  $R_{eH}$** : il massimo valore di tensione raggiunto prima del 1° decremento di forza;  
**Snervamento superiore  $R_{eL}$** : il minimo valore di tensione raggiunto durante la plasticizzazione a snervamento, senza considerare effetti transitori iniziali.

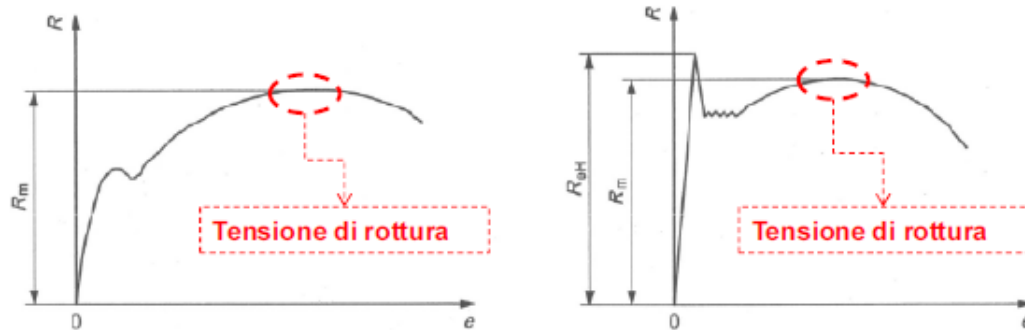
**N.B.** Le figure sono tratte dalla UNI EN ISO 6892:2009:  $R_{eH}$  (snervamento superiore) è quello che corrisponde comunemente alla tensione di snervamento



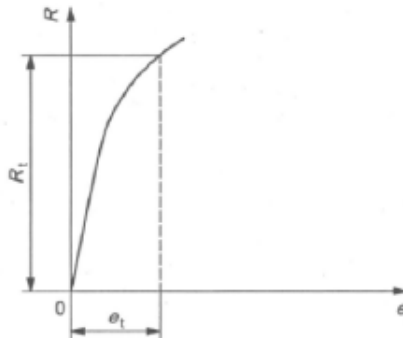
# BARRE D'ARMATURA

## Curve tensione-deformazione

DETERMINAZIONE della TENSIONE di ROTTURA: barre con snervamento definito



DETERMINAZIONE della TENSIONE ad un prefissato livello di allungamento totale



- Si traccia una linea parallela all'asse delle ordinate (forza) ad una distanza da questo pari alla prescritta deformazione totale;
- Il punto di intersezione con la curva di prova corrisponde al valore di  $R_t$ .