



Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale

## Convegno



# La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

**Accordo tra il CSLP ed il Consorzio ReLUIIS  
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022**

**Roma  
24 e 25 ottobre 2023**

**LE TECNICHE DI DIAGNOSTICA IN SITU**

**Prof. Ing. Marco Savoia**

## Non distruttive

- ✓ Endoscopie
- ✓ Sclerometri
- ✓ Carbon test
- ✓ Misure ultrasoniche
- ✓ Scansioni pacometriche (ferro-scan)
- ✓ **Scansioni georadar**
- ✓ **Scansioni tomografiche**
- ✓ Acquisizioni dinamiche in-situ

Ricerche prevalentemente condotte da

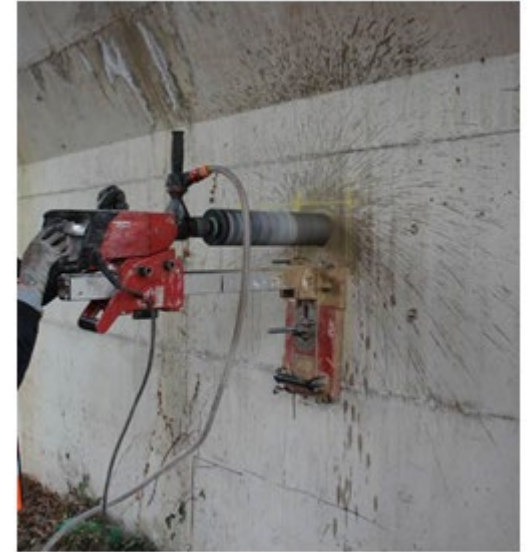
- UNIBO (Mazzotti)
- POLIMI (Felicetti)
- UNIBS (Plizzari)

*I risultati delle prove in situ possono essere proficuamente utilizzate per:*

- A) Eseguire un confronto con i dati di progetto** (spessori degli elementi, resistenza dei materiali etc..)
- B) Verificare eventuali stati di degrado interni agli elementi**, non riscontrabili direttamente con le ispezioni
- C) Eseguire dei confronti tra elementi analoghi per geometria e materiale**, così da verificarne differenze spia di fenomeni di degrado o situazioni critiche.

## Distruttive e Poco Distruttive

- ✓ Carotaggi
- ✓ Prelievo di barre
- ✓ **Rilascio tensionale**



# Prove distruttive e parzialmente distruttive

## Tecniche tradizionali

### Endoscopie

Eseguendo fori passanti è possibile ispezionare l'elemento per mezzo della sonda del videoendoscopio. Tale indagine permette la misurazione dello spessore della parete degli elementi o verificare la presenza di difetti all'interno delle guaine che ospitano i cavi di post-tensione.



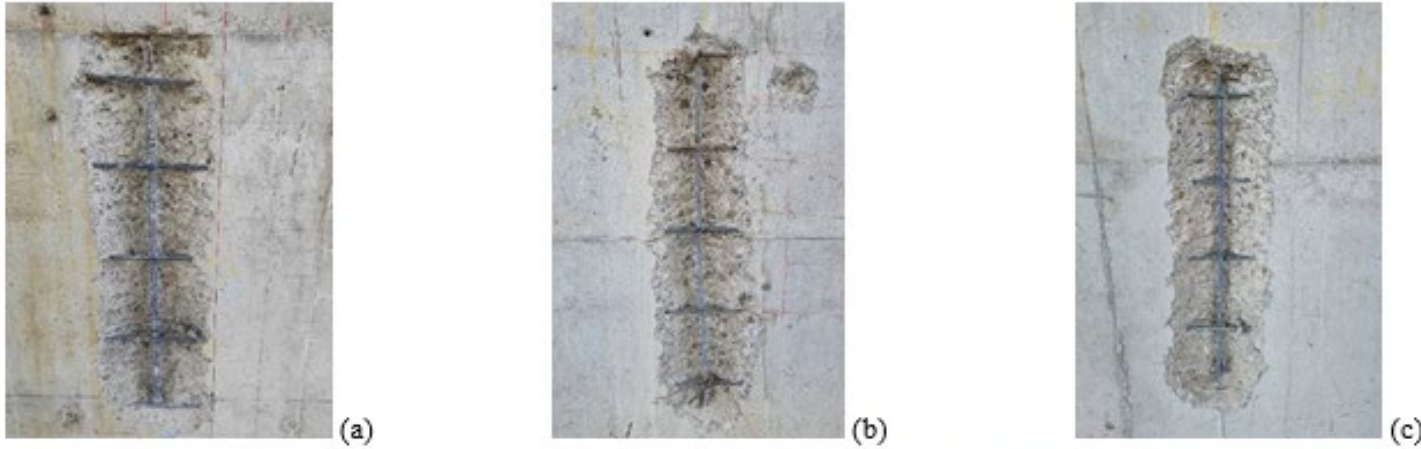
### Saggi dettagli di armatura

Permettono di ottenere una maggiore consistenza dei risultati ottenuti tramite scansioni pacometriche o georadar e di verificare la corrispondenza degli elementi con le tavole di progetto.





## Prelievo di barre



Il prelievo delle barre consente di:

- Verificare coerenza del diametro delle barre con le indicazioni di progetto
- Verificare coerenza della tipologia di acciaio in opera con le indicazioni di progetto
- Definire la resistenza del materiale

*NOTA: La numerosità dei prelievi solitamente è contenuta sia per la notevole invasività dell'operazione sia per l'usuale omogeneità delle caratteristiche dell'acciaio.*



Estrazione barra d'armatura e Prove di trazione: a) Spalla A; b) Pila 5; c) Pila 9 - Viadotto autostradale

Elemento	$L_0$ (mm)	Peso (kg/m)	Area (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$A_{gt}$ (%)
Spalla A	329	4.091	522.79	594.73	680.46	10.97
Pila 5	355	1.569	201.06	485.13	594.25	14.76
Pila 9	312	1.564	198.56	516.37	633.71	15.22

Esempio tabella di riepilogo

## Prelievi di carote e prove di carbonatazione



*Estrazione del provino e Prove di compressione sulle carote di calcestruzzo*

La carota consente di eseguire la prova di carbonatazione oltre che la prova di compressione.

I dati ottenuti consentono di calibrare prove non distruttive.

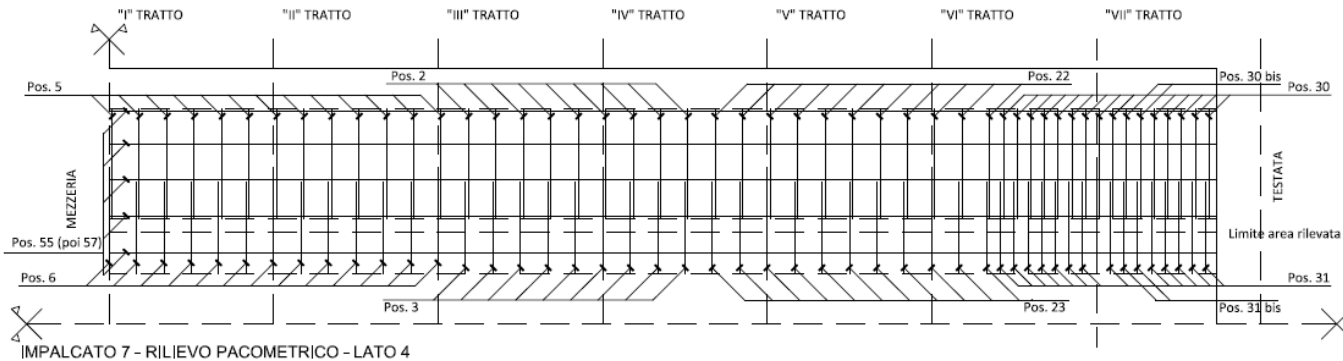
L'analisi comparativa dei risultati su più elementi può fornire informazioni significative e utili alla valutazione dello stato di degrado dell'opera.

		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø (-)	Peso (kg)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Carico (kN)	R <sub>c</sub> (MPa)	F <sub>d</sub>	R <sub>c,ls</sub> (MPa)
CAMPATA 1	Spalla A	104.1	108.1	1.04	2.06	2235	500	59	1.00	59
	Spalla A	103.9	107.3	1.03	1.98	2180	435	51	1.00	51
	Pila 1: Prospetto A	45.2	46.1	1.02	0.16	2223	109	68	1.00	68
	Pila 1: Prospetto A	45.2	43.3	0.96	0.15	2208	92	57	1.00	57
	Impalcato 1	104.1	109.1	1.05	2.18	2352	740	87	1.00	87
CAMPATA 2	Impalcato 1	104.2	107.6	1.03	2.12	2308	765	90	1.00	90
	Pila 1: Prospetto B	103.9	103.5	1.00	1.96	2232	595	70	1.00	70
CAMPATA 3	Pila 2: Prospetto A	45.2	49.5	1.09	0.18	2304	96	60	1.00	60
	Pila 2: Prospetto B	103.9	104.6	1.01	1.96	2209	490	58	1.00	58
	Pila 3: Prospetto A	45.2	46.2	1.02	0.17	2280	99	62	1.00	62
CAMPATA 4	Pila 3: Prospetto A	45.3	47.7	1.05	0.17	2241	96	60	1.00	60
	Pila 3: Prospetto B	103.8	107.5	1.04	2.03	2227	435	51	1.00	51
	Pila 4: Prospetto A	44.7	45.6	1.02	0.17	2331	93	59	1.00	59
	Pila 4: Prospetto A	44.7	45.6	1.02	0.17	2331	89	56	1.00	56
CAMPATA 5	Pila 4: Prospetto A	44.8	44.5	0.99	0.16	2341	96	61	1.00	61
	Pila 4: Prospetto B	104.0	106.6	1.02	2.03	2240	538	63	1.00	63
	Pila 5: Prospetto A	45.2	46.5	1.03	0.17	2210	74	46	1.00	46
CAMPATA 6	Pila 5: Prospetto B	104.0	108.4	1.04	2.05	2223	443	52	1.00	52
	Pila 6: Prospetto A	45.2	44.6	0.99	0.16	2288	105	65	1.00	65
CAMPATA 7	Pila 6: Prospetto A	45.3	45.0	0.99	0.17	2322	101	63	1.00	63
	Pila 6: Prospetto B	103.9	109.6	1.05	2.09	2244	463	55	1.00	55
	Pila 7: Prospetto A	45.2	44.9	0.99	0.17	2291	88	55	1.00	55
CAMPATA 8	Pila 7: Prospetto A	45.4	45.2	1.00	0.16	2229	90	56	1.00	56
	Pila 7: Prospetto B	104.0	104.7	1.01	1.98	2220	455	54	1.00	54
CAMPATA 9	Pila 8: Prospetto A	45.2	46.5	1.03	0.17	2213	70	44	1.00	44
	Pila 8: Prospetto B	104.0	107.7	1.04	2.04	2226	425	50	1.00	50
CAMPATA 10	Pila 9: Prospetto A	104.0	108.9	1.05	2.07	2230	430	51	1.00	51
	Pila 9: Prospetto B	45.2	45.6	1.01	0.17	2281	91	57	1.00	57
	Pila 9: Prospetto B	45.2	45.7	1.01	0.16	2235	84	52	1.00	52
CAMPATA 11	Pila 10: Prospetto A	45.2	45.5	1.01	0.16	2202	72	45	1.00	45
	Pila 10: Prospetto A	45.3	46.4	1.02	0.16	2184	70	44	1.00	44
CAMPATA 12	Pila 10: Prospetto B	103.9	107.6	1.04	2.01	2202	395	47	1.00	47
	Pila 11: Prospetto A	103.9	107.0	1.03	1.97	2173	390	46	1.00	46
CAMPATA 12	Pila 11: Prospetto B	45.2	46.4	1.03	0.16	2203	76	47	1.00	47
	Pila 12: Prospetto A	45.2	46.0	1.02	0.16	2170	78	48	1.00	48
	Pila 12: Prospetto A	103.8	108.4	1.04	2.01	2186	313	37	1.04	38

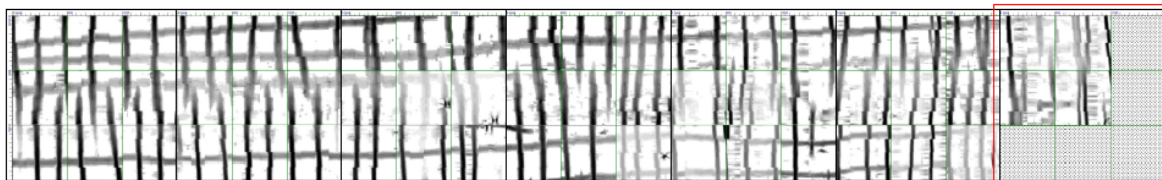
*Esempio di tabella riepilogativa delle prove*

## Scansioni pacometriche

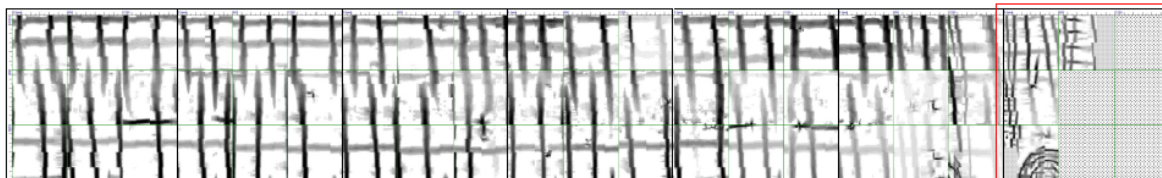
Tramite le scansioni pacometriche è possibile il rilievo della maglia dell'armatura, sia per il confronto con i dati di progetto che per individuare porzioni di calcestruzzo in cui effettuare carotaggi.



IMPALCATO 7 - RILIEVO PACOMETRICO - LATO 4

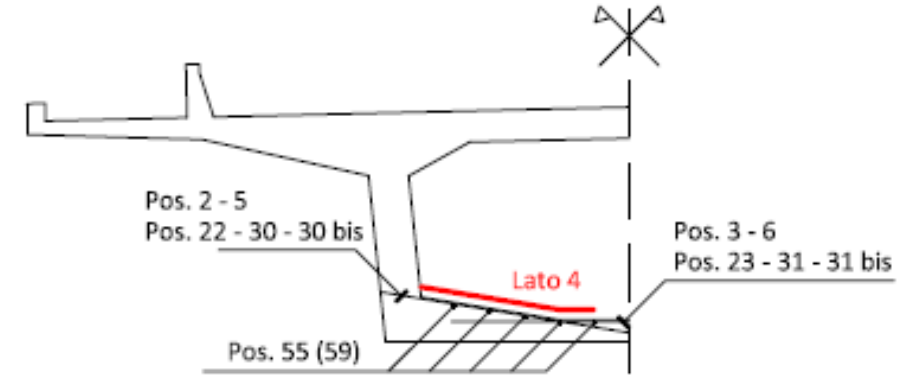


IMPALCATO 8 - RILIEVO PACOMETRICO - LATO 4



Area di difficile rilevazione per la presenza del coperchio del ritengo antisismico

## ARMATURA SECONDARIA - SEZIONE TIPO



### Info Scansione

2021-02-01 15:48:25 30716010

### Cursore di posizione

X: 82 mm Y: 598 mm

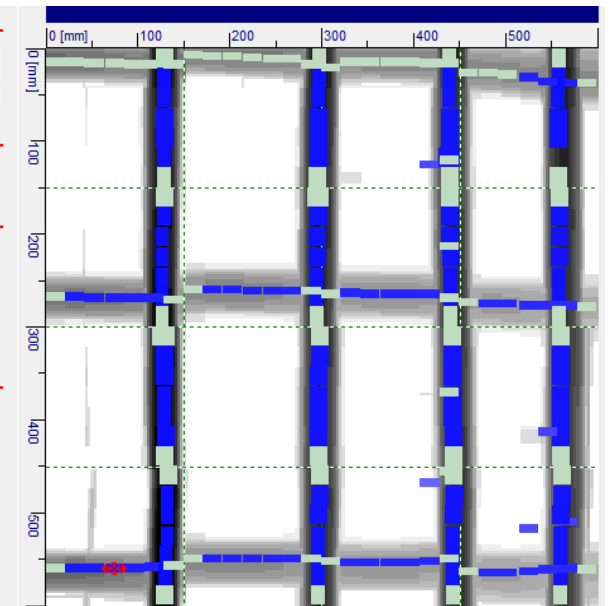
### Settaggio

oriz. Diametro ferro: 10mm  
vert. Diametro ferro: -- ? --

Piano d'appoggio: 0

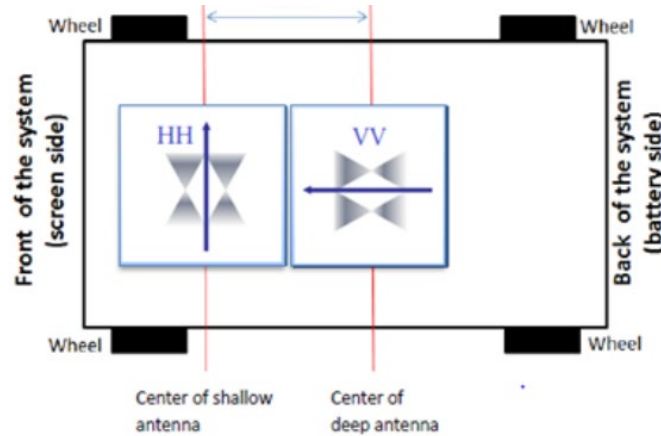
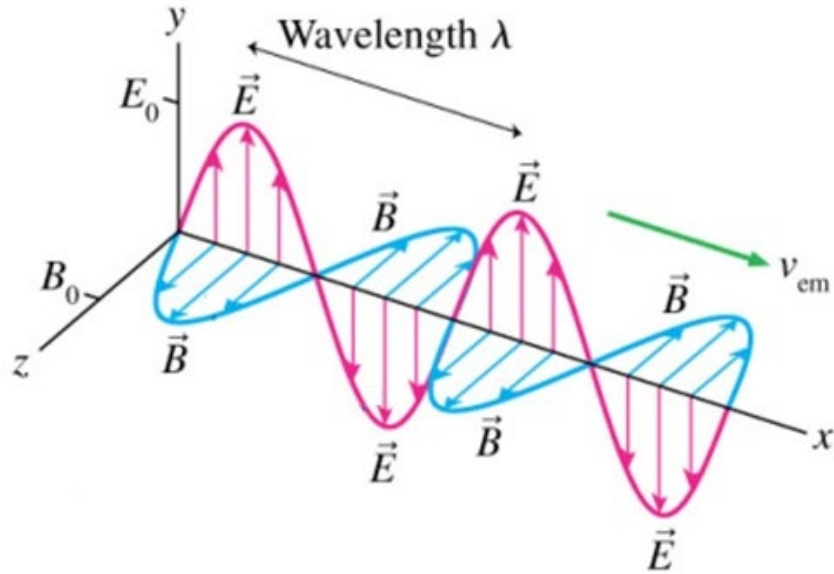
### Risultato misurazione

X: 74 mm Ferro dir.: Orizzontale  
Y: 560 mm Stato: Ok  
Cop: 28 mm Ferro: 10mm

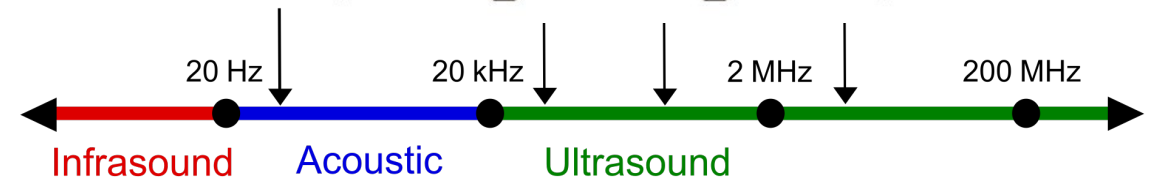
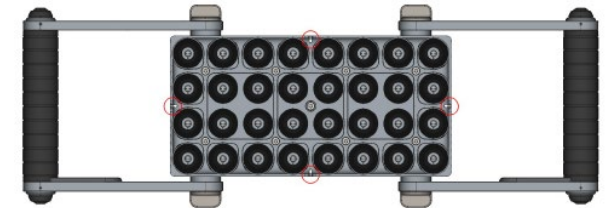
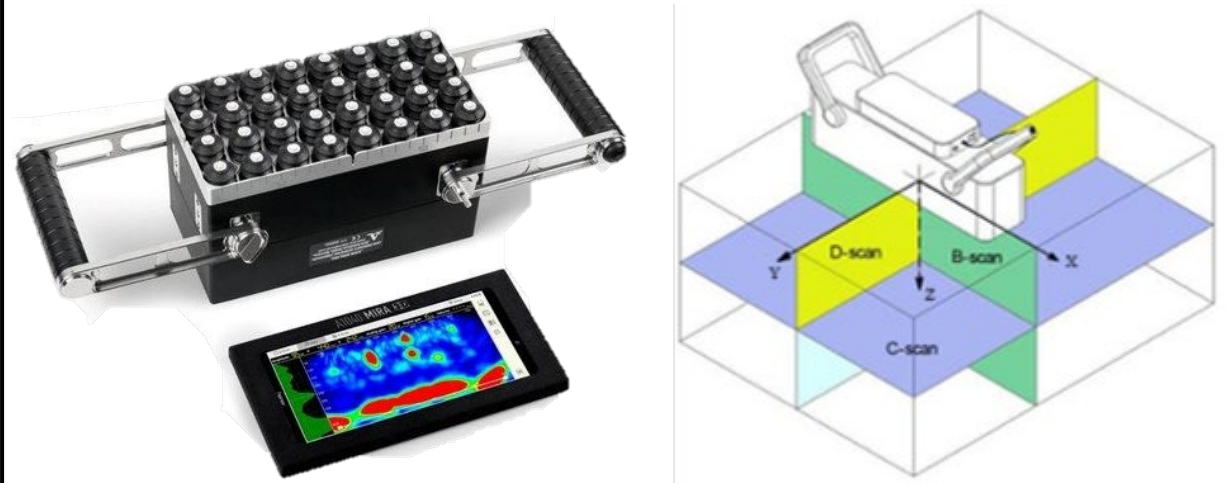




## Ground Penetrating Radar (Georadar)



## Tomografia a ultrasuoni



- Trasduttori attivi a matrice 4x8 Dry-Point-Contact (DPC)
- Campo di frequenze (kHz): 10→100
- Metodi di funzionamento: Lineare & Matriciale

Frequenza centrale 2 GHz

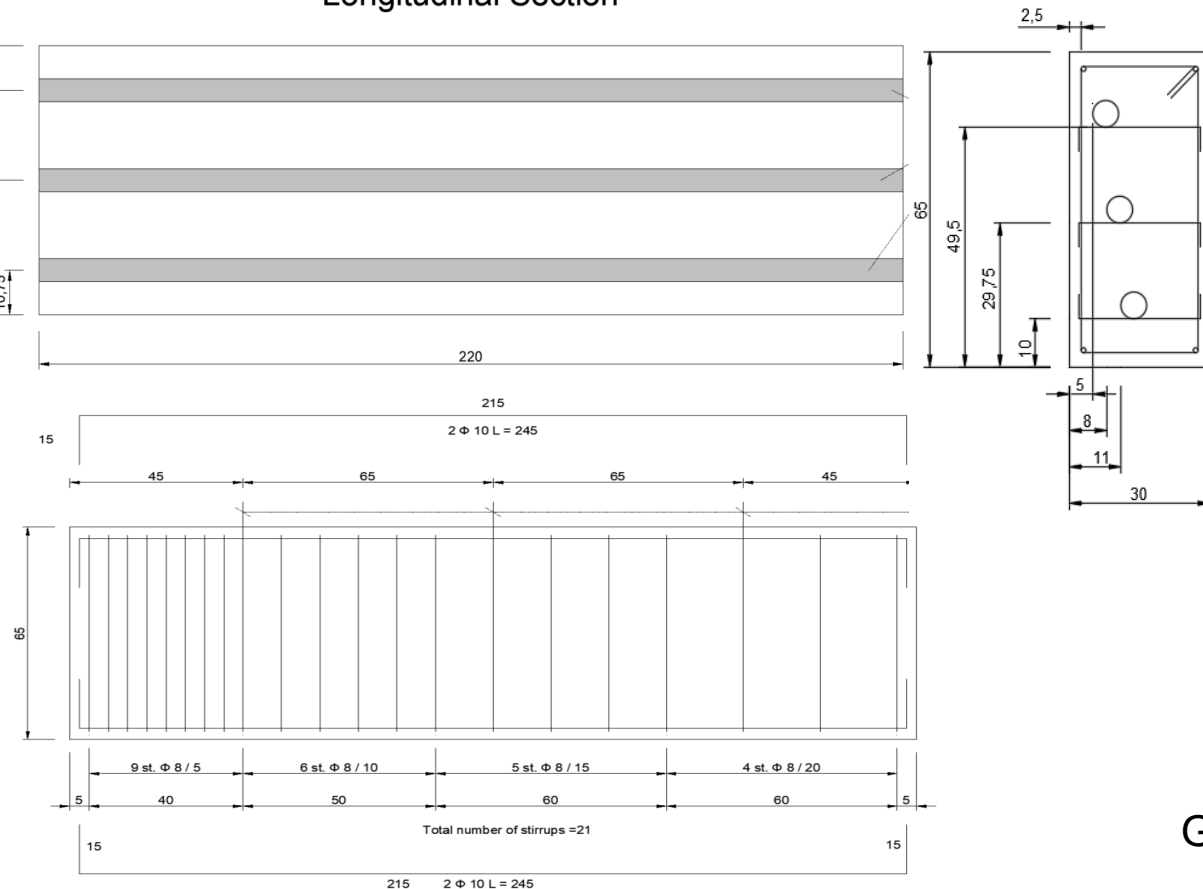
Antenna Bipolare

## Scansioni Georadar

Gli studi sono stati portati avanti su campioni a grandezza reale realizzati utilizzando sia guaine metalliche che plastiche.

In alcuni casi sono stati inseriti anche dei difetti, così da simulare casi reali.

Longitudinal Section



Guaine interrotte artificialmente



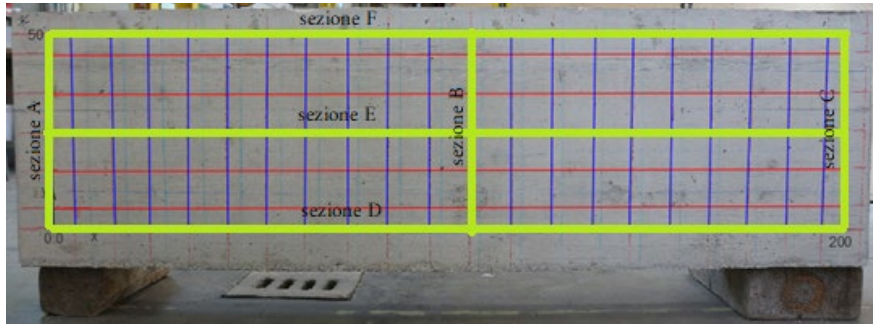
Trave con guaine metalliche



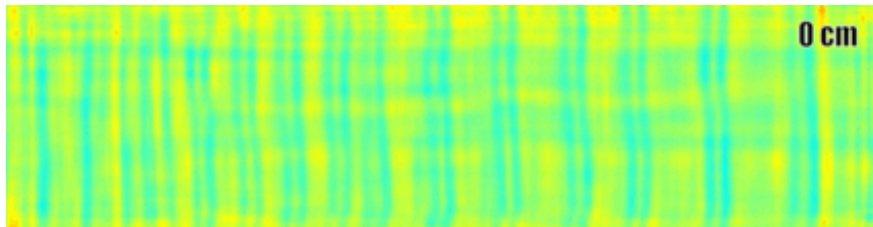
Trave con guaine plastiche



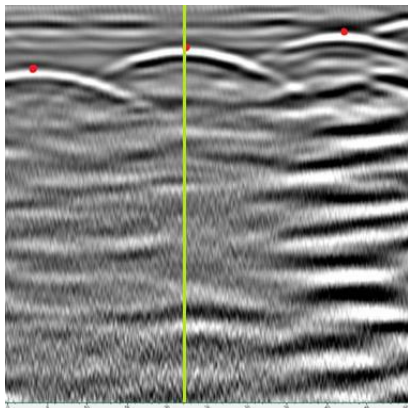
## Caso delle guaine metalliche vuote



Griglia di acquisizione 10x10cm



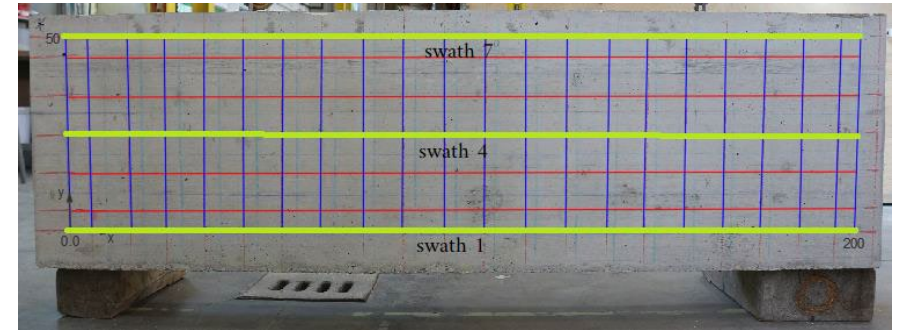
C-Scan



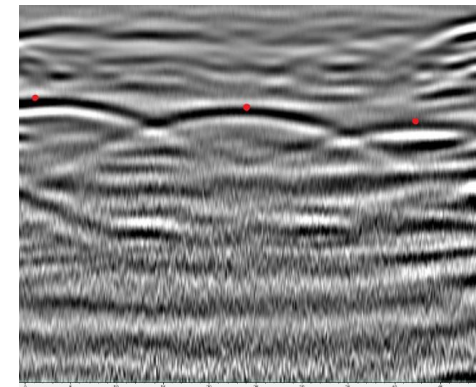
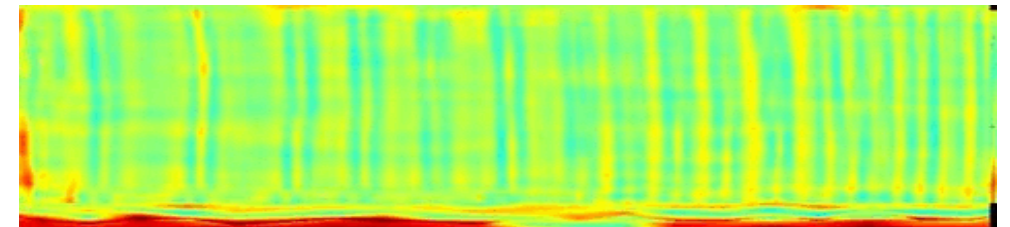
La profondità deve essere considerata in relazione alla posizione dei punti rossi, ovvero sulla sommità della linea bianca.

B - Scan

## Caso delle guaine plastiche vuote

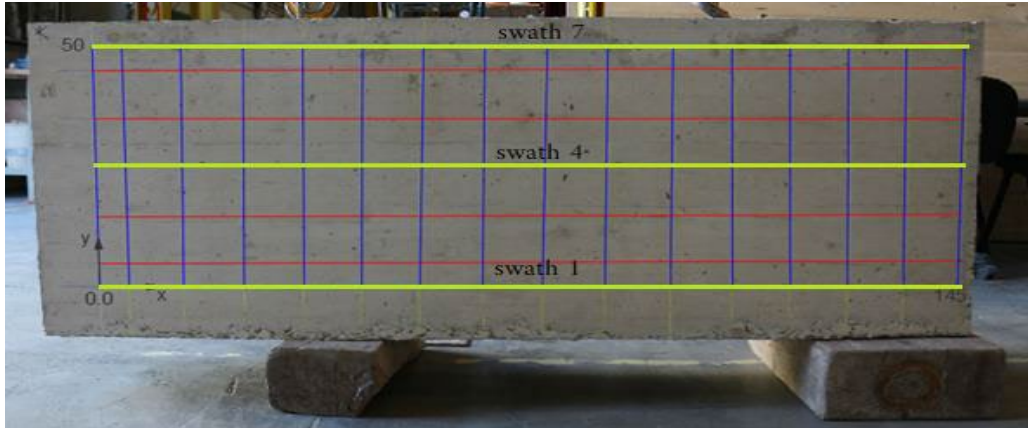


Griglia di acquisizione 10x10cm

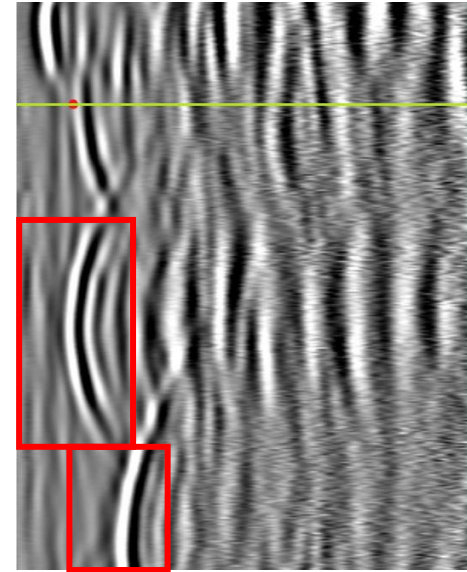


La profondità deve essere considerata in relazione alla posizione dei punti rossi, ovvero sulla sommità della linea nera.

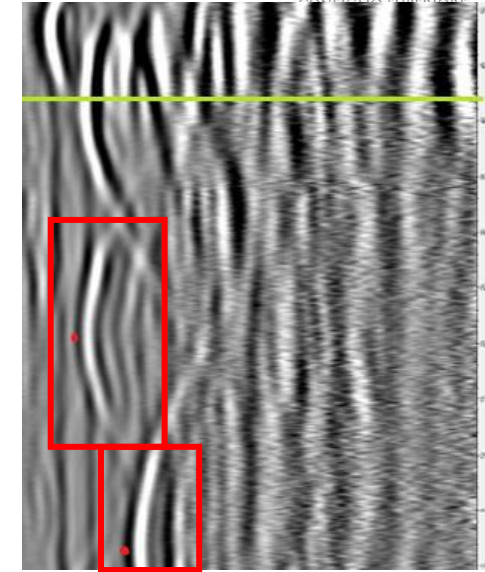
## Caso delle guaine metalliche con difetti



Griglia di acquisizione 10x10cm

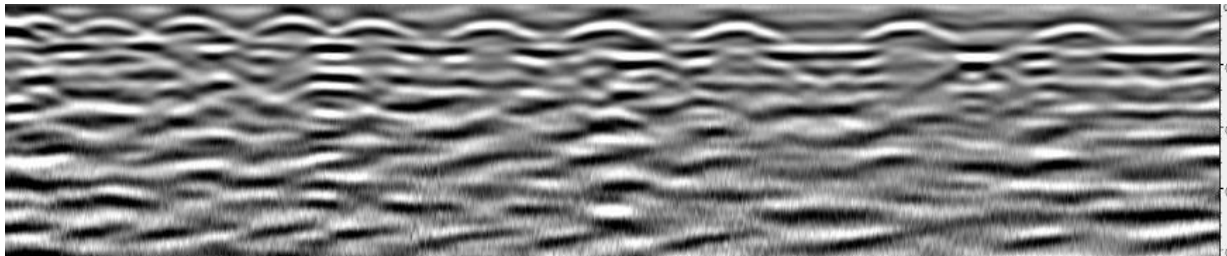


Guaine metalliche vuote

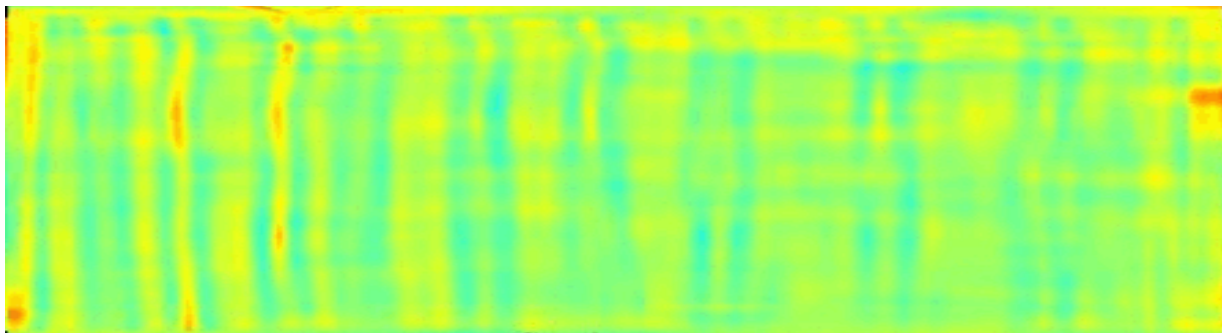


Guaine con difetti

Differenza fra i due casi



B-Scan

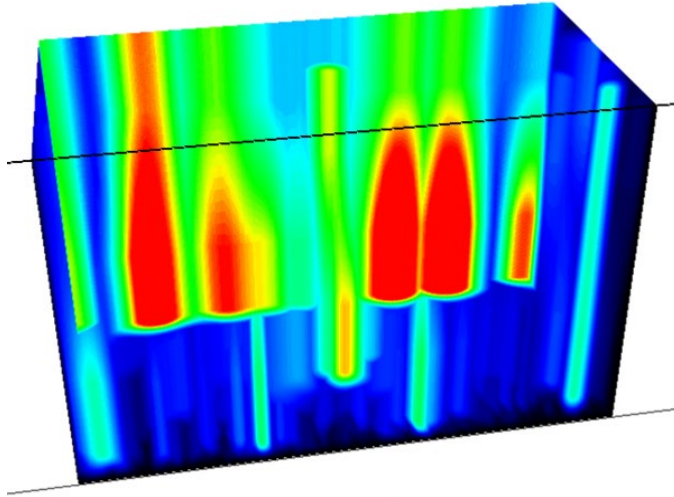


C-Scan



## Scansioni Tomografiche ad ultrasuoni

Campioni in calcestruzzo armato opportunamente realizzati in cui sono state immerse delle guaine sia plastiche che metalliche, riempite o meno in modo da simulare casi reali.



Guaina vuota



Guaina con sola  
boiaccia



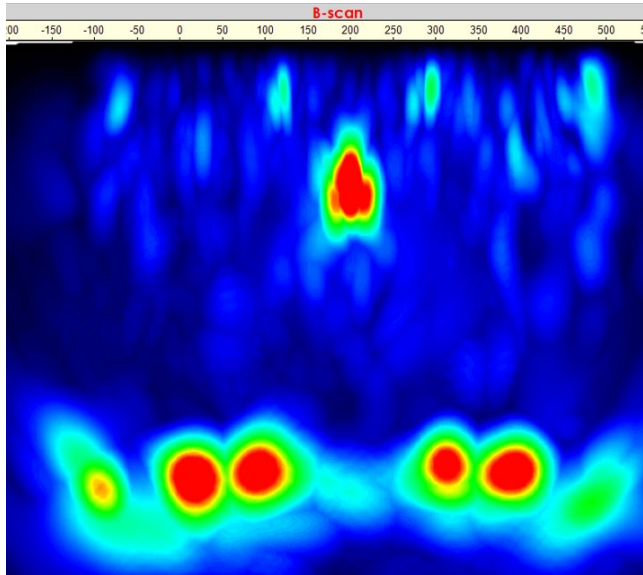
Guaina con trefoli e  
boiaccia ben iniettata



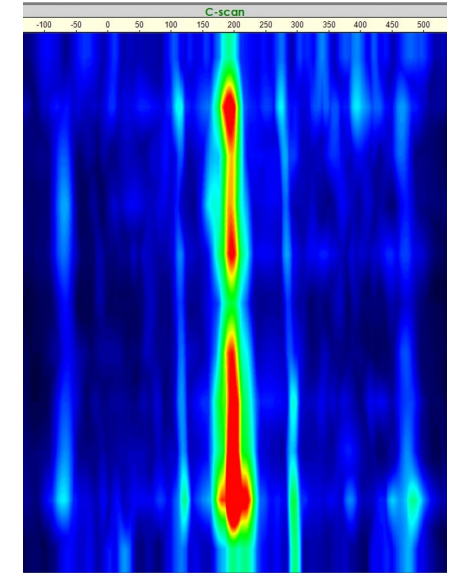
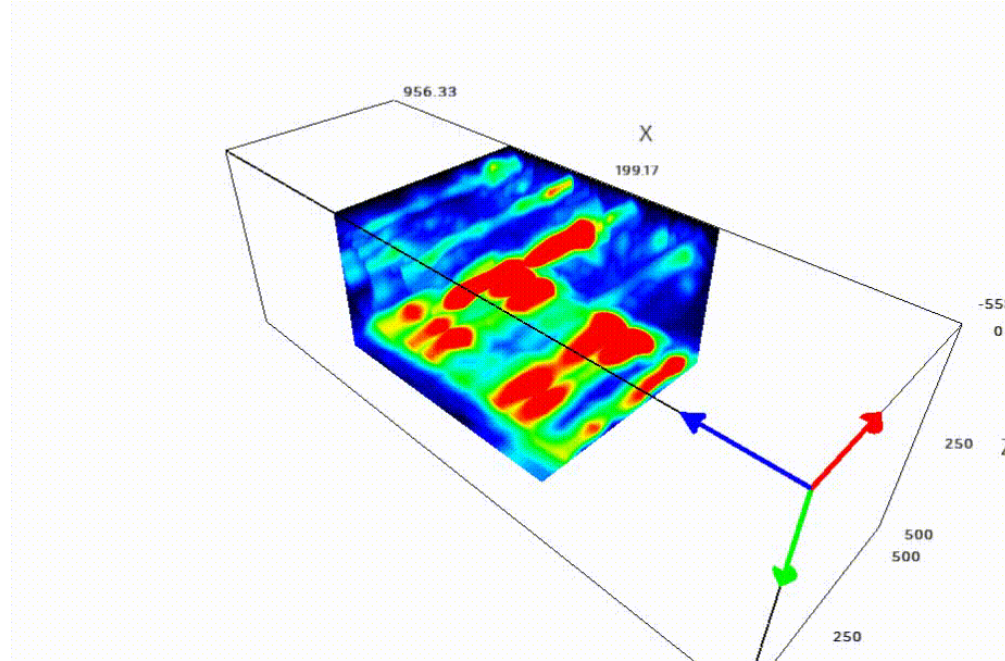
Guaina con trefoli,  
boiaccia parzialmente  
iniettata (a simulare  
difetto tipico)



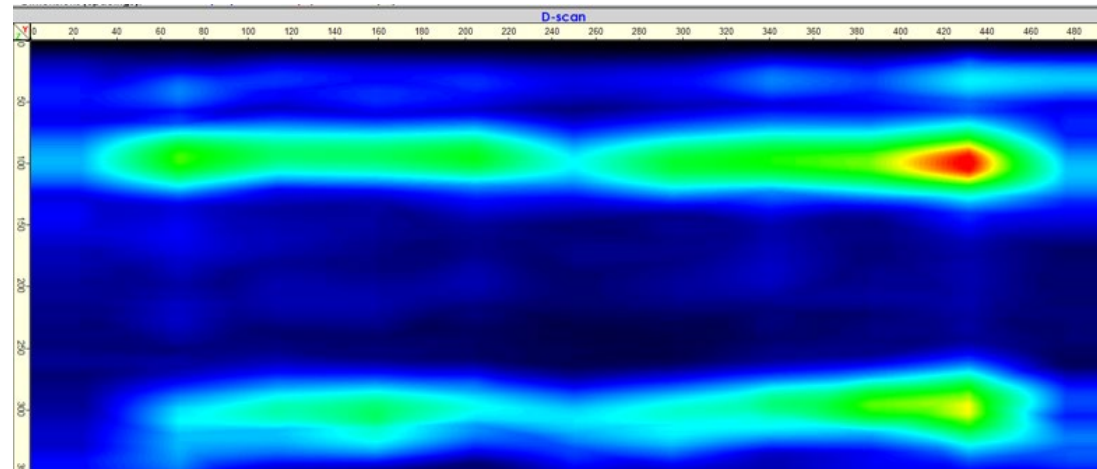
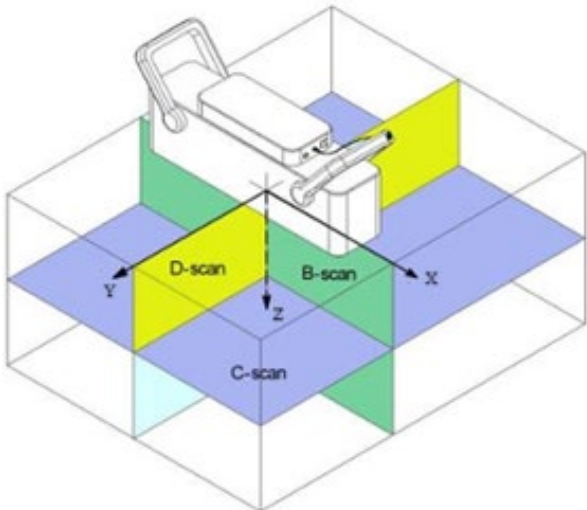




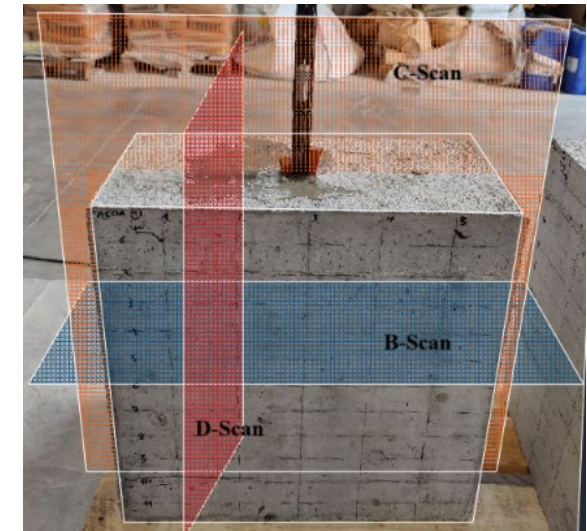
B-Scan



C-Scan



D-Scan



## Tomografia pulse-echo sui cavi di post-tensione

tomografo A1040 MIRA



A1040 MIRA 3D

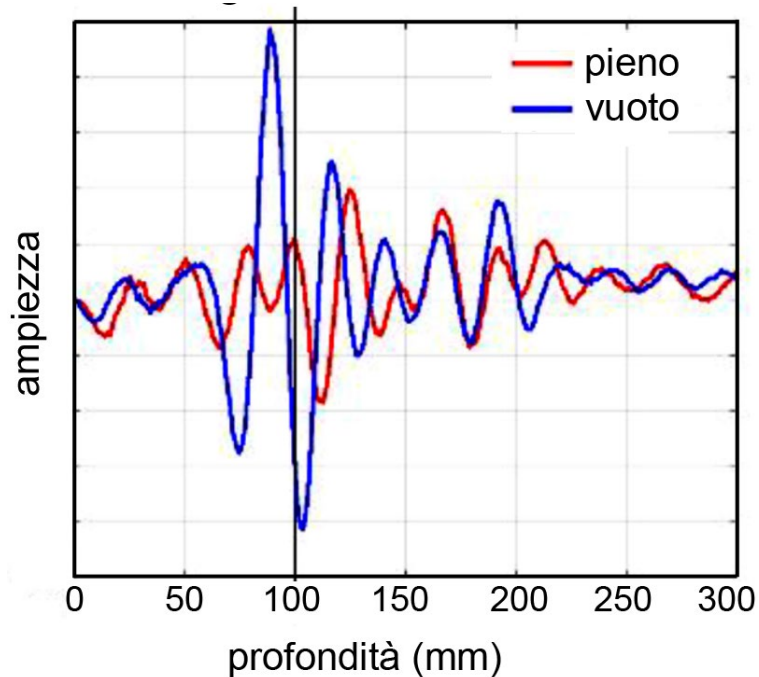


### attività svolte e in corso

- sviluppo di software (LabVIEW, Matlab, Python) per la creazione di mappe tomografiche (SAFT);
- ricerca indicatori di qualità delle iniezioni (intensità riflettori, riflessioni secondarie, fase dell'onda);
- prime verifiche su benchmark di laboratorio;
- manuale utente (funzionamento, configurazione, l'utilizzo ottimale);
- basi teoriche (la tecnica di focalizzazione, estrazione di parametri rappresentativi)

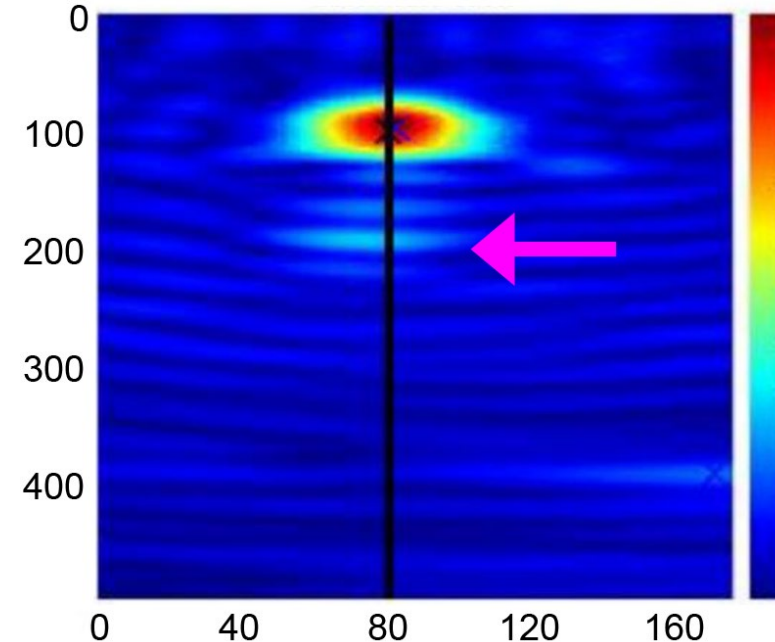
## Tomografia pulse-echo sui cavi di post-tensione

ampiezza e fase  
del segnale riflesso



il cavo vuoto riflette di più  
e con fase inversa

riflessione secondaria



il cavo pieno consente  
la propagazione degli impulsi US  
e una seconda riflessione sul lato opposto



## Sviluppo di un nuovo metodo vacuometrico per la stima del volume dei vuoti nei cavi di post-tensione

pompa SUP  
a doppia azione



1.4 bar

sensore di  
pressione  
dinamico



0-2 bar, 1200Hz  
accuratezza  $\pm 0.15\%$  fs

**principali caratteristiche**

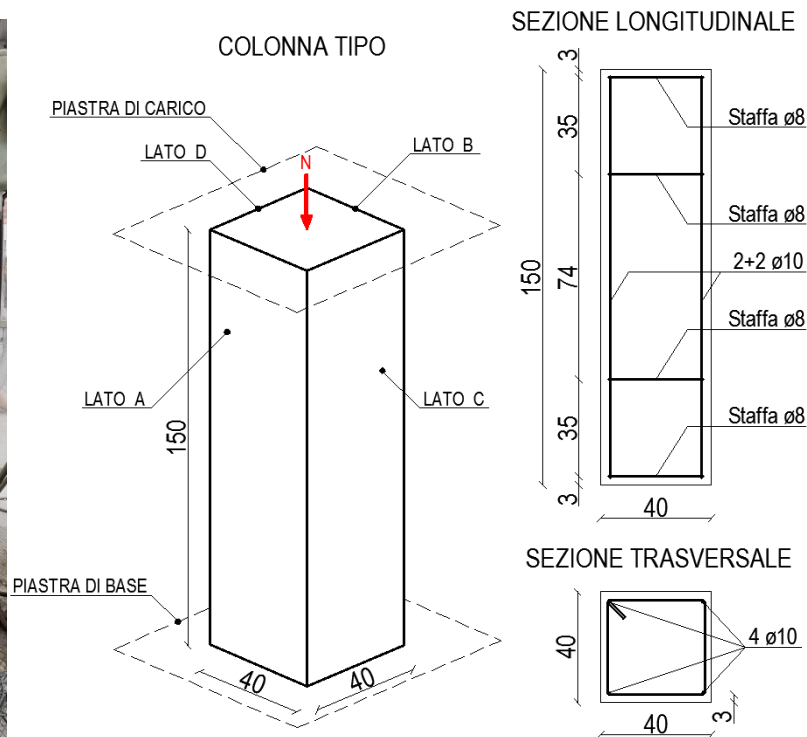
- ciclo compressione/espansione
- insensibile ad eventuali perdite
- basato su strumentazioni low-cost
- funzionamento a batteria
- connessione a secco con la guaina del cavo

## Prove di rilascio tensionale

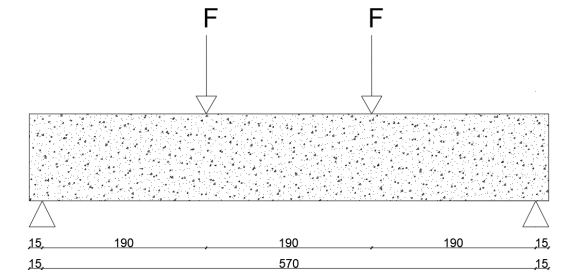
Permettono di valutare lo stato di pretensione residuo negli elementi in C.A.P.

I test sono stati portati avanti mettendo a punto due set-up sperimentali e impiegando diversi metodi di taglio ed estrazione

a) Colonne con applicazione di uno sforzo assiale esterno, usate per valutare il metodo di taglio più efficace



b) Travi in vera grandezza con cavi precompressi a tensione nota





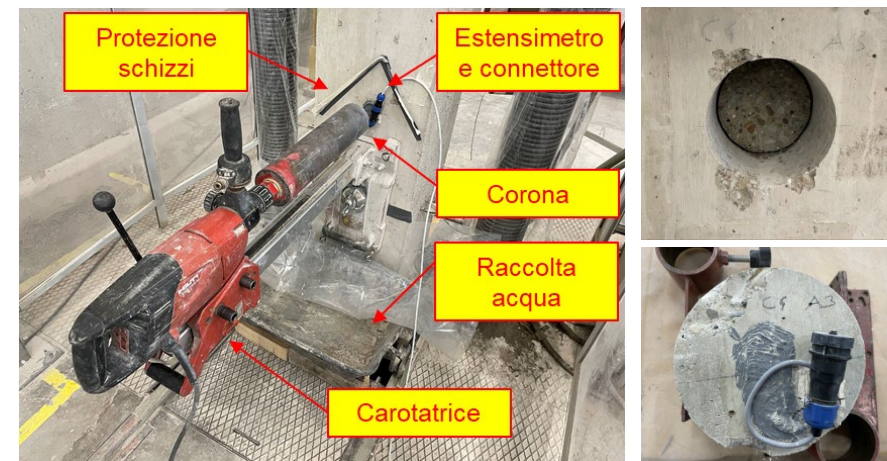
## Set-up di prova



## Estrazione mediante tagli

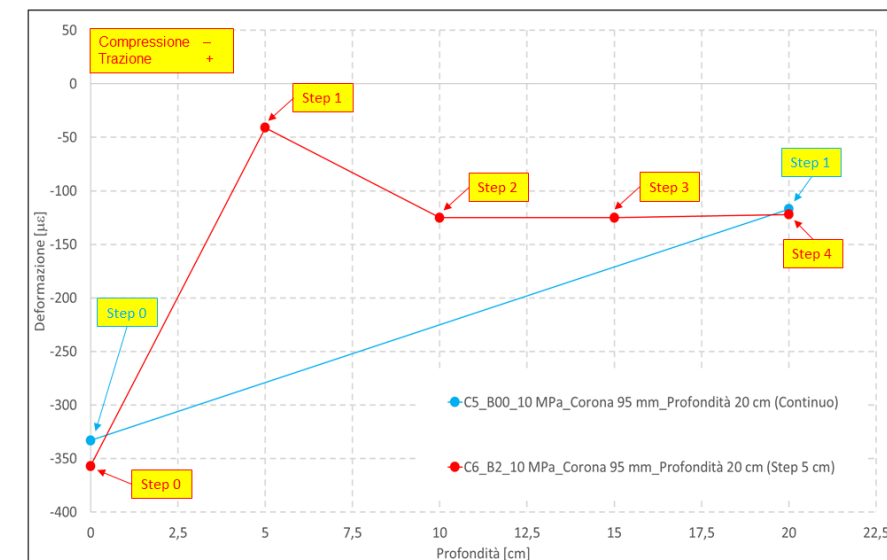
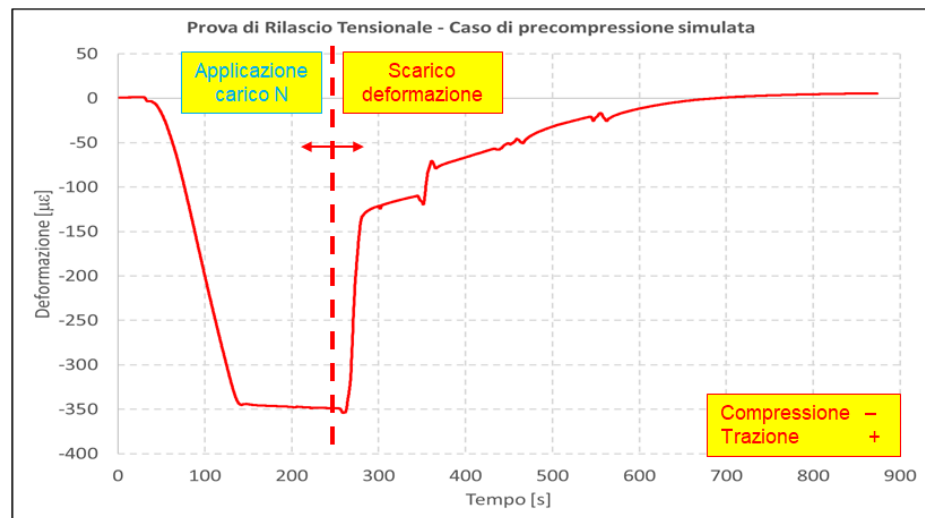


## Prelievo mediante carotaggio



Prove realizzate:

- Prove di rilascio tensionale;
- Prove di rilascio tensionale finalizzate alla valutazione del ritiro differenziale.





Prove realizzate sulla trave:

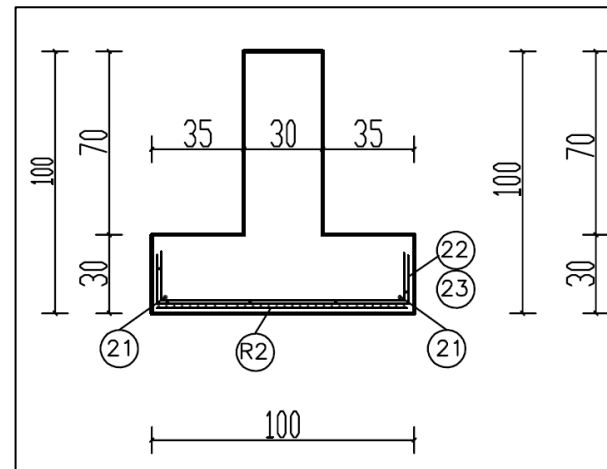
- Prove di rilascio tensionale sulla trave scarica;
- Prove di rilascio tensionale sulla stessa trave con un carico esterno.



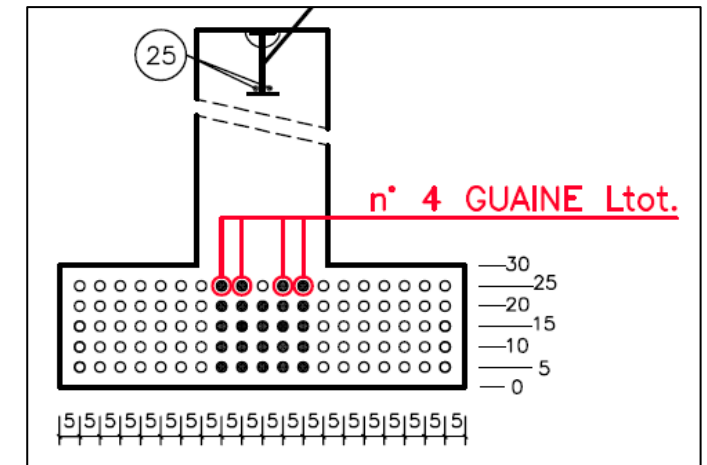
Vista assonometrica della trave esaminata.

Caratteristiche meccaniche:

- $f_c = 103 \text{ MPa}$ ,  $R_c = 124 \text{ MPa}$ ;
- $E = 45000 \text{ MPa}$ ;
- $f_{ct} = 5 \text{ MPa}$ ;
- Armatura lenta B450C;
- Quattro strati di trefoli da 0,6”;
- Perdite di carico stimate: 20%.

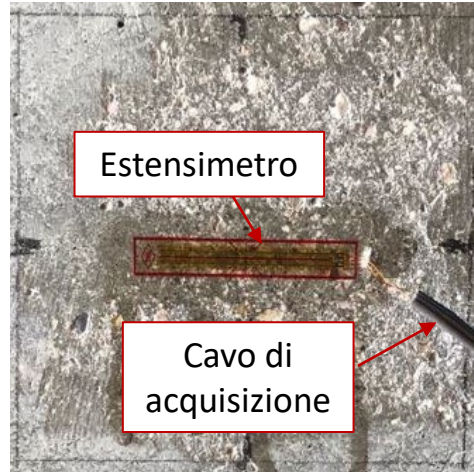


Sezione della testata della trave.

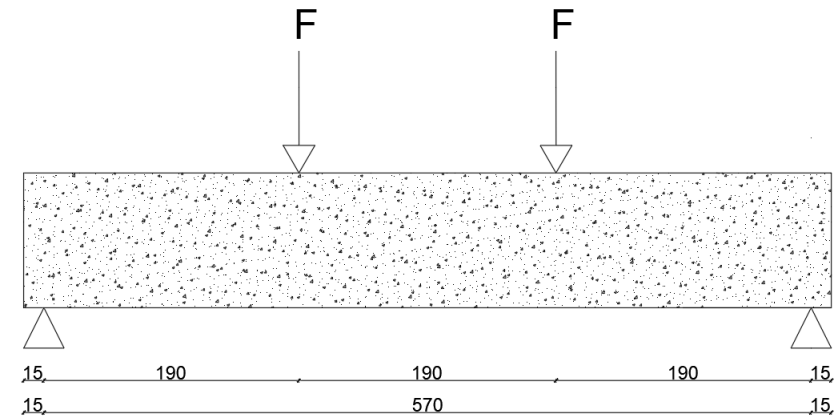


Trefoli di precompressione.

## Set-up di prova



Preparazione della prova.



Set-up di prova: flessione a 4 punti.

## Esempio di tagli e risultati

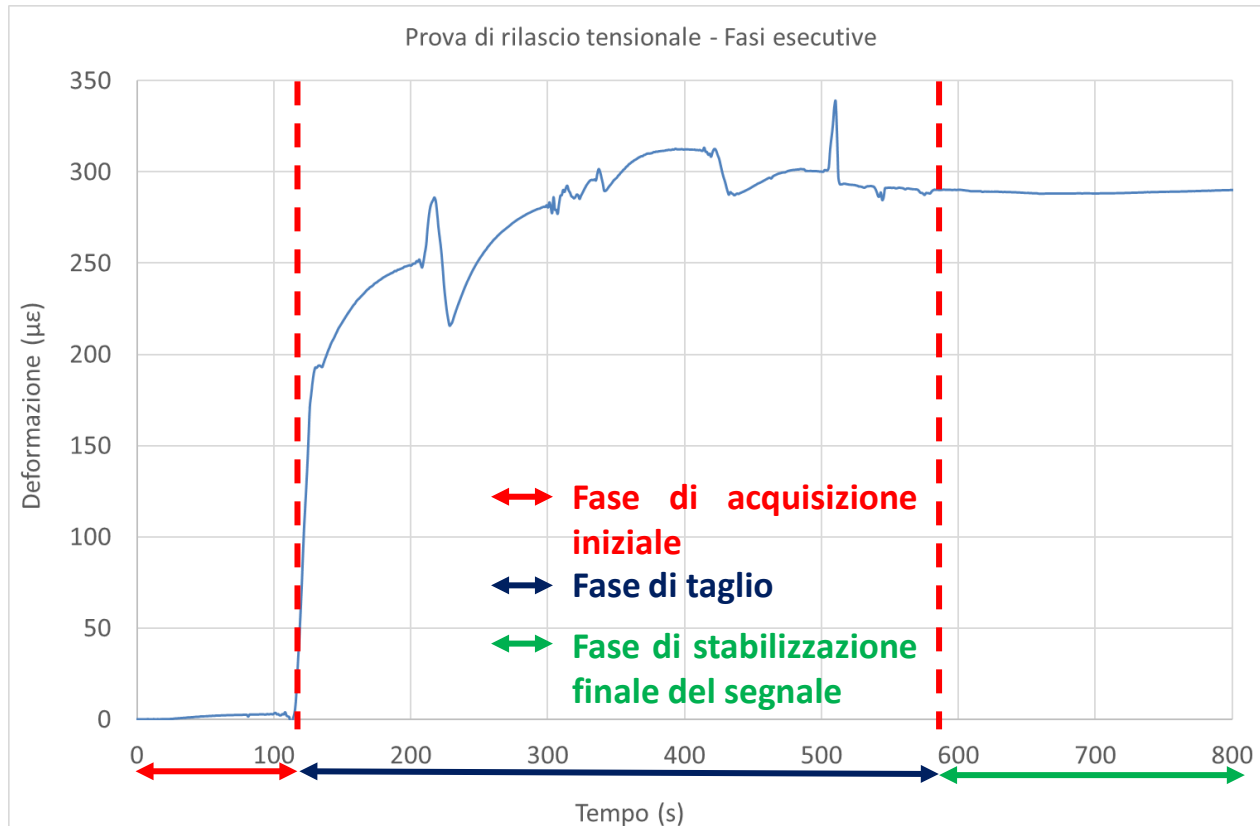
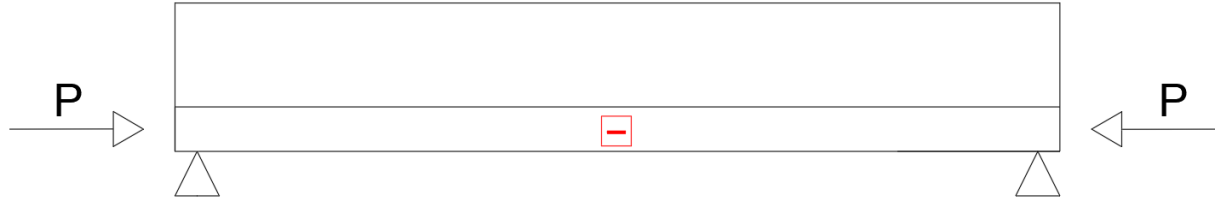
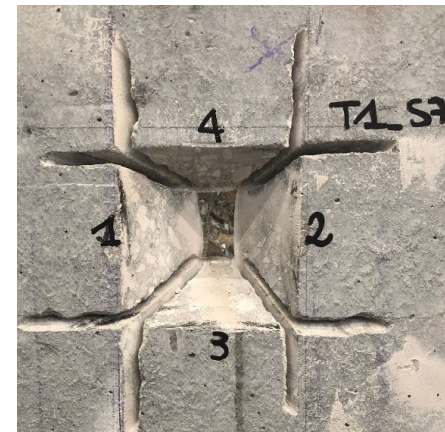


Grafico deformazione ( $\mu\epsilon$ ) – tempo (s).

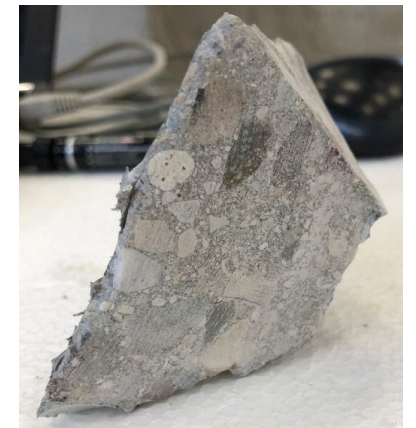
Si misura la deformazione  $\epsilon$  che subisce il calcestruzzo all'interno di un provino di forma tronco-piramidale.



Fase di taglio.



Tagli per l'estrazione del provino.



Provino estratto.

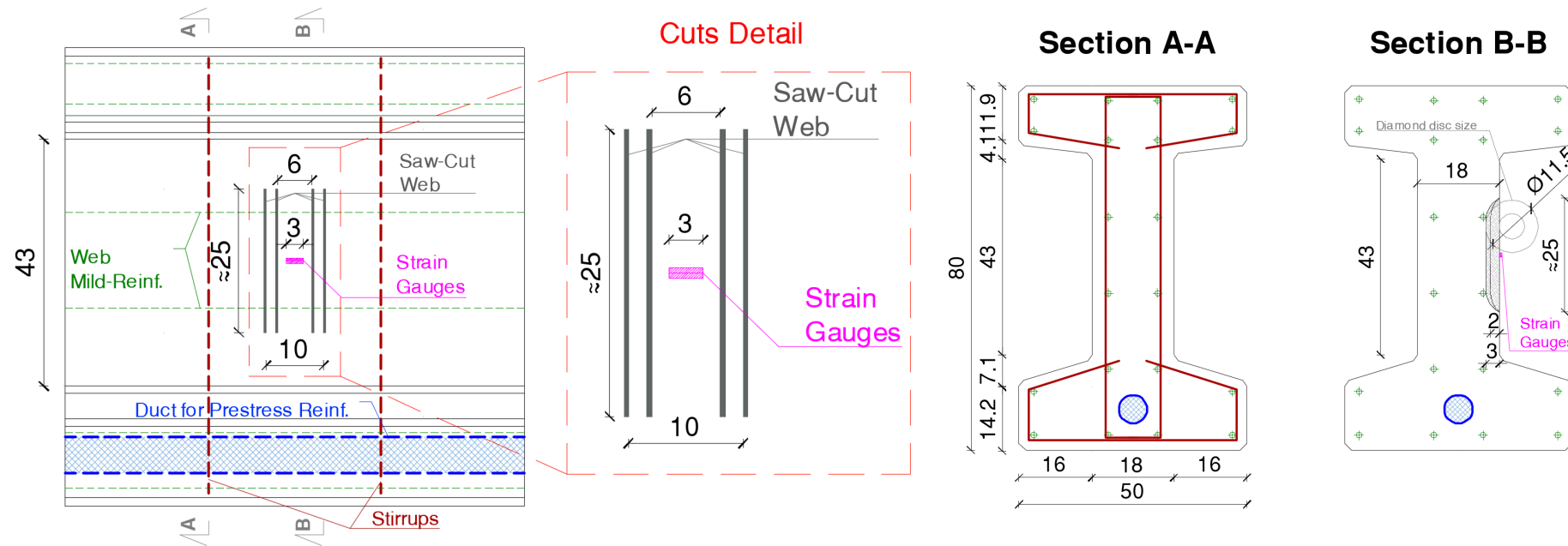


## Side view

## Cuts Detail

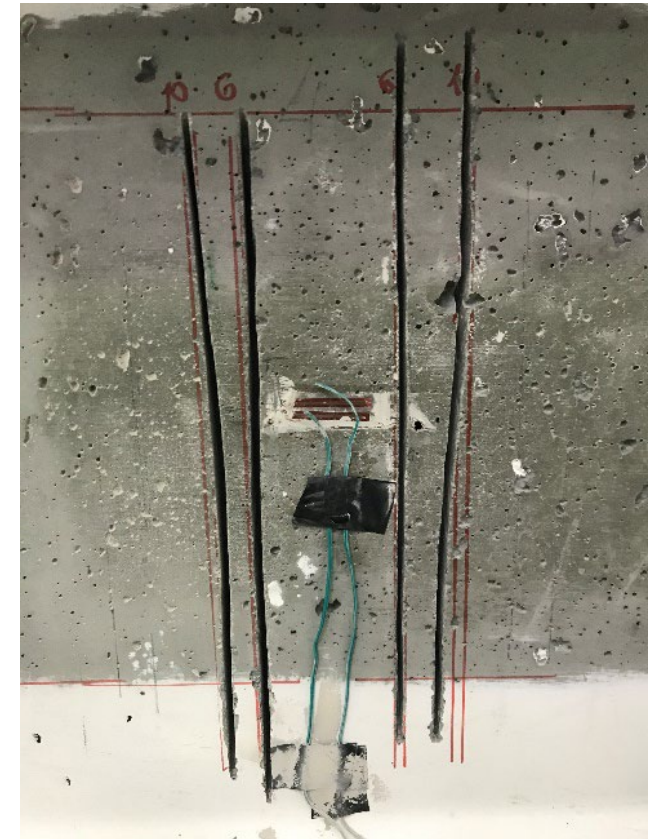
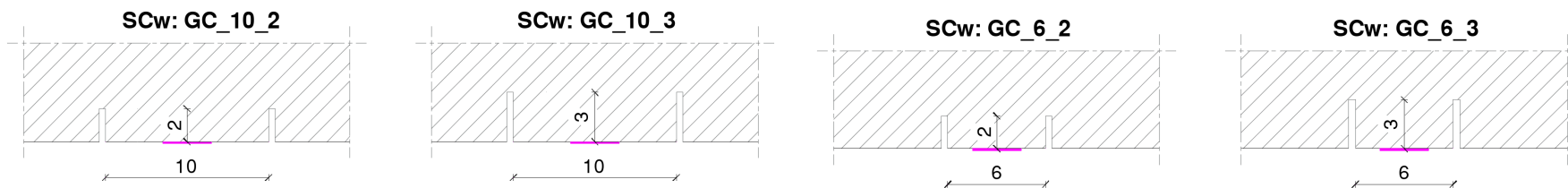
## Section A-A

## Section B-B

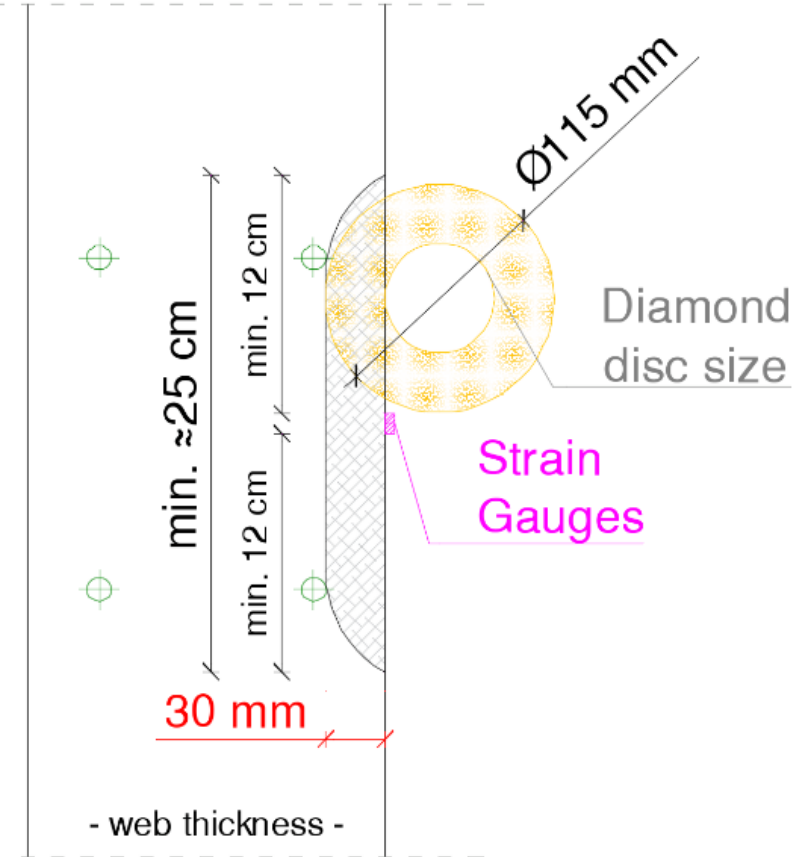
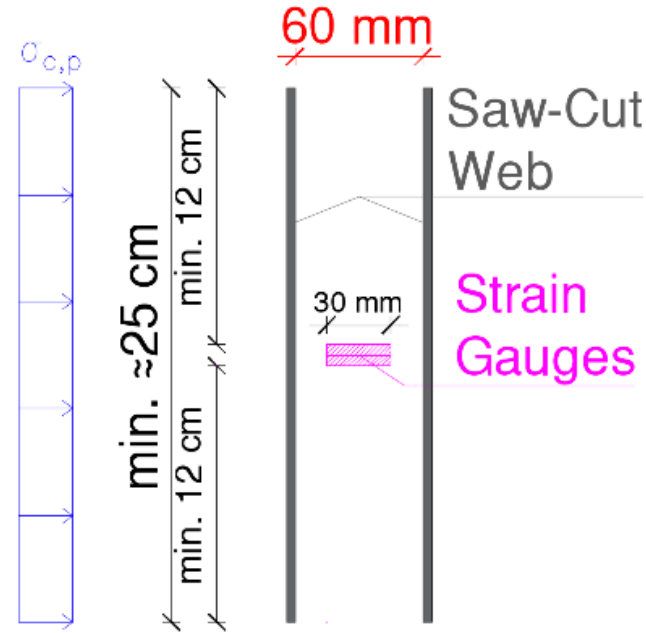


## Geometric Configuration

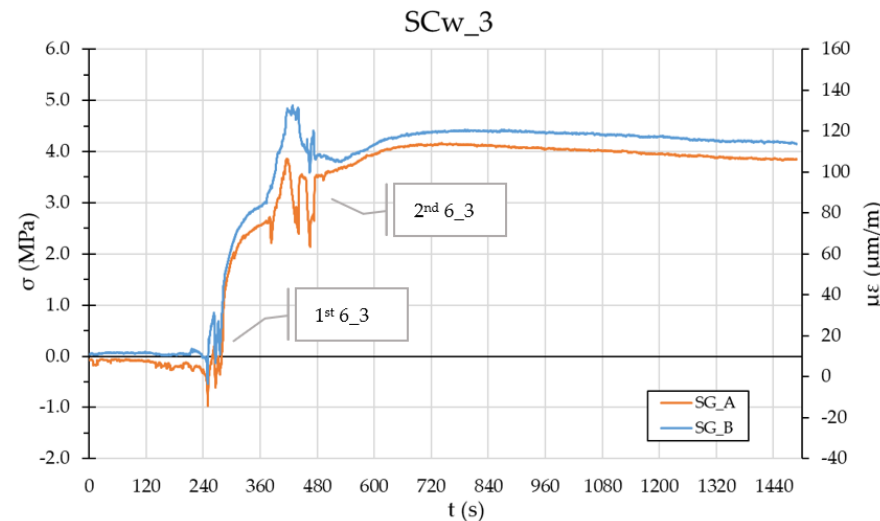
View: Plane section



- Parallel cuts 6 - 10 cm apart
- Depth 2 - 3 cm



- Test easily performed with traditional tools
- There is no risk of damaging the strands or stirrups
- Only underestimates the real stress in concrete by 10% with GC\_6\_3



Example of strain gauge data acquisition

metodo ottico per la misura della deformazione  
(studio di fattibilità)

1 Mpa  $\approx$  30 microstrain

spostamento su 50mm di gauge length = 1.5 micron



Whittemore  
ripetibilità accoppiamento  
1-2 micron



microscopio USB  
0.35 micron/pixel  
ripetibilità = ?