



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Seminario FAD - Cisco WebEx Ordine Ingegneri Napoli

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI SULLE OPERE IN CAP
APPLICAZIONI AL CALCESTRUZZO E ALL'ARMATURA PRE-TESA

Napoli, 1° marzo 2023

Salvatore Perno

salvatore.perno@uniroma1.it

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Osservazioni preliminari:

E' doveroso considerare lo stato di precompressione residua dell'opera, al fine di poter:

- valutare compiutamente la risposta attesa e il comportamento nel tempo delle strutture in c.a.p.;
- effettuare correttamente le necessarie verifiche allo Stato Limite di Esercizio e quindi principalmente esprimersi sulla durabilità dell'opera;
- individuare attraverso gli effetti sulla precompressione di fenomeni di danno alle armature spesso altrimenti non facilmente individuabili.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Osservazioni preliminari:

Le previsioni progettuali in termini di precompressione sono di fatto previsioni di massima, che spesso non trovano riscontro nella realtà (spesso valori più bassi).

Cause possibili di disturbo:

- Maggiore effetto della viscosità nel cls (tempo di applicazione del carico, difetti di impasto) e del rilassamento nell'acciaio (la norma considerava comunque in generale valori in sicurezza) rispetto ai valori considerati in relazione di calcolo
- Difetti di conferimento della precompressione iniziale (nei tempi e nei modi)
- Eventi intervenuti nella vita dell'opera

Una carrellata sui possibili metodi ...

- ➔ • **METODI ELASTO MAGNETICI** (*EM methods*)
- ➔ • **METODI ACUSTO ELASTICI**
- ➔ • **METODI BASATI SULLO STUDIO DELLA VARIAZIONE DELL'IMPEDENZA MECCANICA**
- ➔ • **METODI BASATI SULLO STUDIO DEL COMPORTAMENTO DINAMICO**
- ➔ • **METODI BASATI SULLA MISURA DELLA VARIAZIONE DI DEFORMAZIONE**

METODI ELASTO MAGNETICI (*EM methods*)

Le proprietà magnetiche dell'acciaio dipendono dal suo stato tensionale.

- Si applica un campo magnetico (mediante un solenoide) e si legge la tensione in un solenoide secondario.
- La tensione è proporzionale alla permeabilità magnetica. Il valore dipende dallo stato tensionale e dalla temperatura (i loro effetti non sono disaccoppiati). L'effetto della temperatura può essere corretto (Zonta et al)
- ➔ • Metodi applicabili per provare cavi liberi (stralli etc.). Non sono di facile applicazione nel caso di cavi immersi nel cls (oppure preinseriti nel getto)

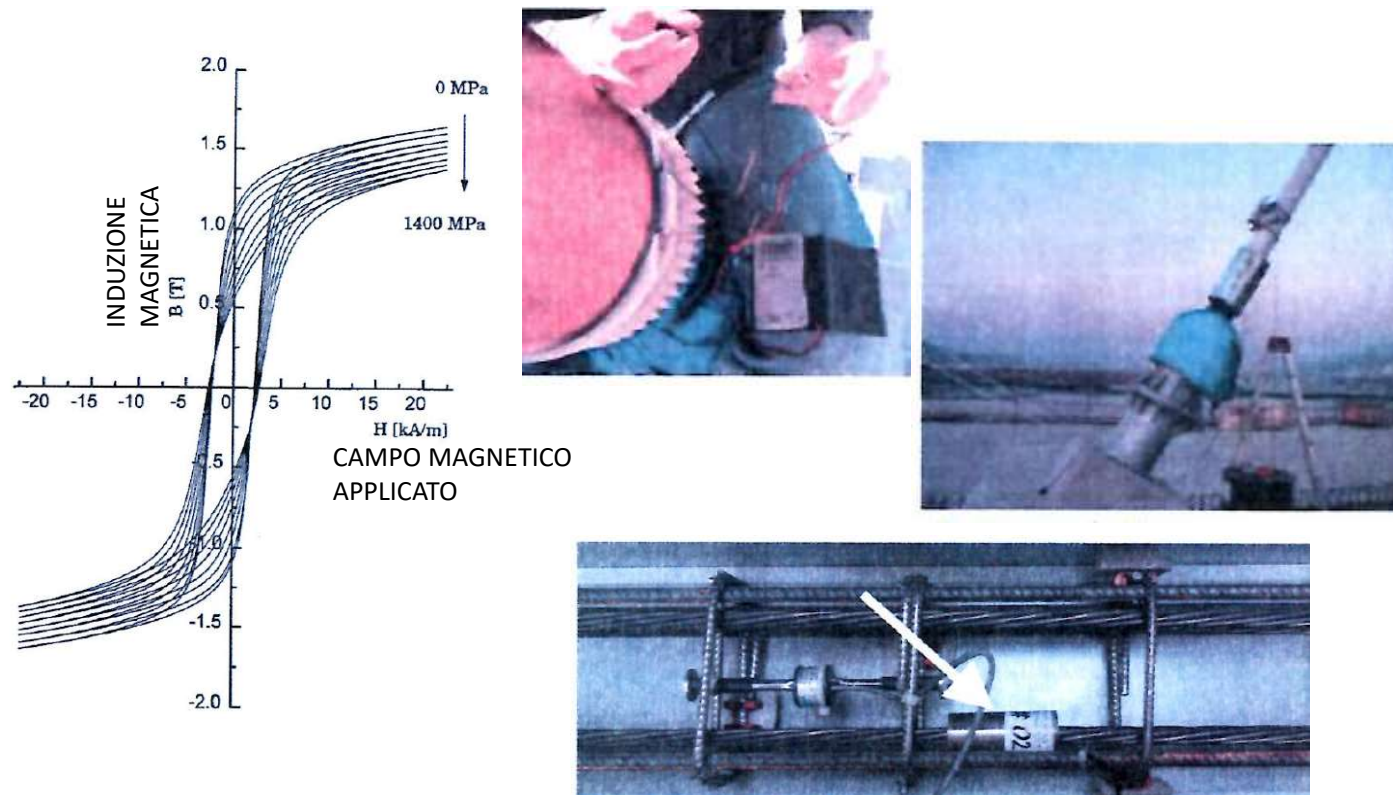
PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

METODI ELASTO MAGNETICI (*EM methods*)



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

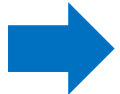
METODI ACUSTO ELASTICI

La velocità degli ultrasuoni in una barra dipende dal suo stato tensionale.

$$V_{\sigma} = V_0 (1 + k \sigma) \quad V_0 = [(\lambda + 2 \mu) / \rho]^{0,5}$$

$K \Rightarrow$ il valore di calcolo deve essere corretto mediante prove sperimentali ma è difficile da stimare

Forte attenuazione del segnale (il cavo non è isolato)



Difficile da utilizzare (di fatto impossibile)

METODI BASATI SULLO STUDIO DELLA VARIAZIONE DELL'IMPEDENZA MECCANICA

Rapporto fra forza meccanica (modulo della forzante sinusoidale) applicata e risposta (velocità massima) indotta.

- L'eccitazione è fornita attraverso sistemi piezoelettrici
- La misura, generalmente applicata sulla testata, è fortemente influenzata da variazioni di condizioni di vincolo
- ➔ • Di difficile applicazione sugli impalcati esistenti

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

PROVE DINAMICHE

In assenza di fessure, la variazione di precompressione (interna) non altera in sostanza i parametri dinamici.

Eventi accessori rendono illeggibili le variazioni.

Il c.d. «*compression softening*» nel caso di cavi interni non ha luogo.

I metodi dinamici comunque sono utili per:

- Evidenziare e studiare anche dal punto di vista evolutivo quadri fessurativi
- Evidenziare irregolarità e difettosità strutturali degli impalcati

Hanno il vantaggio di risultare

Economici

Non invasivi

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

In conclusione della carrellata ...



TABLE 2 Comparison of methods for monitoring of prestressing forces

	Vibration	Impedance	Elasto-magnetic	Acoustoelastic	Strain
Sensitivity to prestress force changes	Debatable	High (locally)	High	Low	High
Effects of environmental factors	High	High	High (can be calibrated)	Not explored	High (can be compensated)
Distribution of force along the structure	Not feasible, global	Local but only at anchorage	Feasible, local	Not feasible, global	Feasible, local
Feasibility of instrumentation	High	High	Low	High	High
Applicability to real-life structures	Unfeasible	Feasible with calibration	Feasible with calibration	Feasible with attenuation considerations	Feasible

Hiba Abdel Jaber, Branco Glisic *Struct. Control Health Monit* 2019; 26; e2374

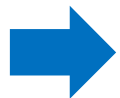
PROVE BASATE SULLA MISURA DELLA VARIAZIONE DI DEFORMAZIONE

Riguardano specificatamente un materiale:

- Calcestruzzo
- Armatura (nel c.a.p. armatura di precompressione)



Forniscono un'indicazione puntuale (rappresentativa?)



Rientrano fra le prove cosiddette «Semidistruttive» e devono prevedere un ripristino



Possono, specie per il cls, accompagnarsi alle operazioni di prelievo volto alla conoscenza delle caratteristiche dei materiali.

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO

Misura della variazione della deformazione dovuta al rilascio dello stato tensionale operato mediante parziale o totale isolamento di un elemento di cls.

Tecnica di base

- Pratica di un foro a distruzione, un taglio o un carotaggio per variare (alleviare) localmente il campo di tensione e misura della correlata variazione di deformazione
- Valutazione della tensione, a partire dalla deformazione, tenendo conto delle proprietà elastiche del materiale e della geometria della tipologia di prova eseguita.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

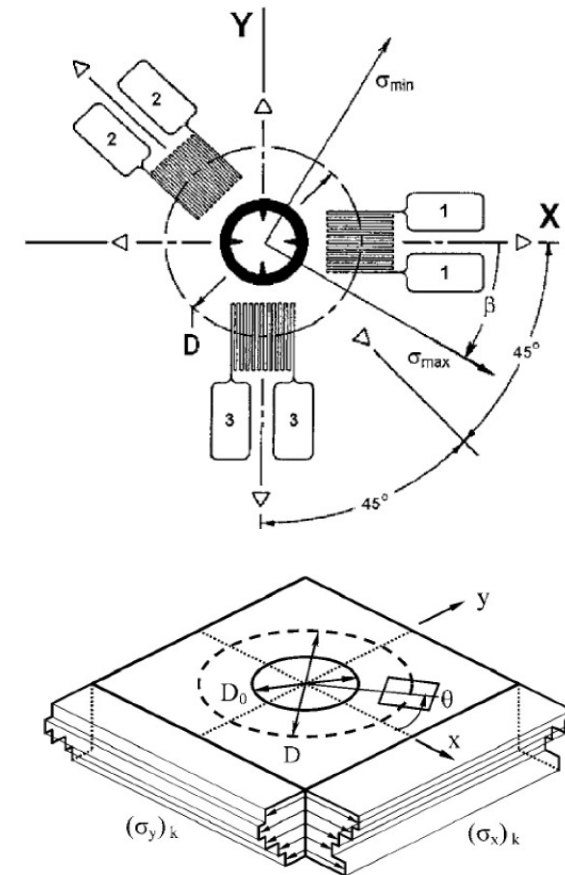
LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO

TECNICHE DI INTERESSE

Hole Drilling Strain-Gage Method ASTM E837-08

Metodo semidistruttivo (non influenza significativamente la risposta dell'elemento)

- Lontano da bordi e irregolarità
- Esecuzione di un foro nel centro geometrico della zona strumentata con misura delle deformazioni
- Il foro è eseguito per step (problemi termici)
- Il rilascio misurato dipende dalla profondità



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



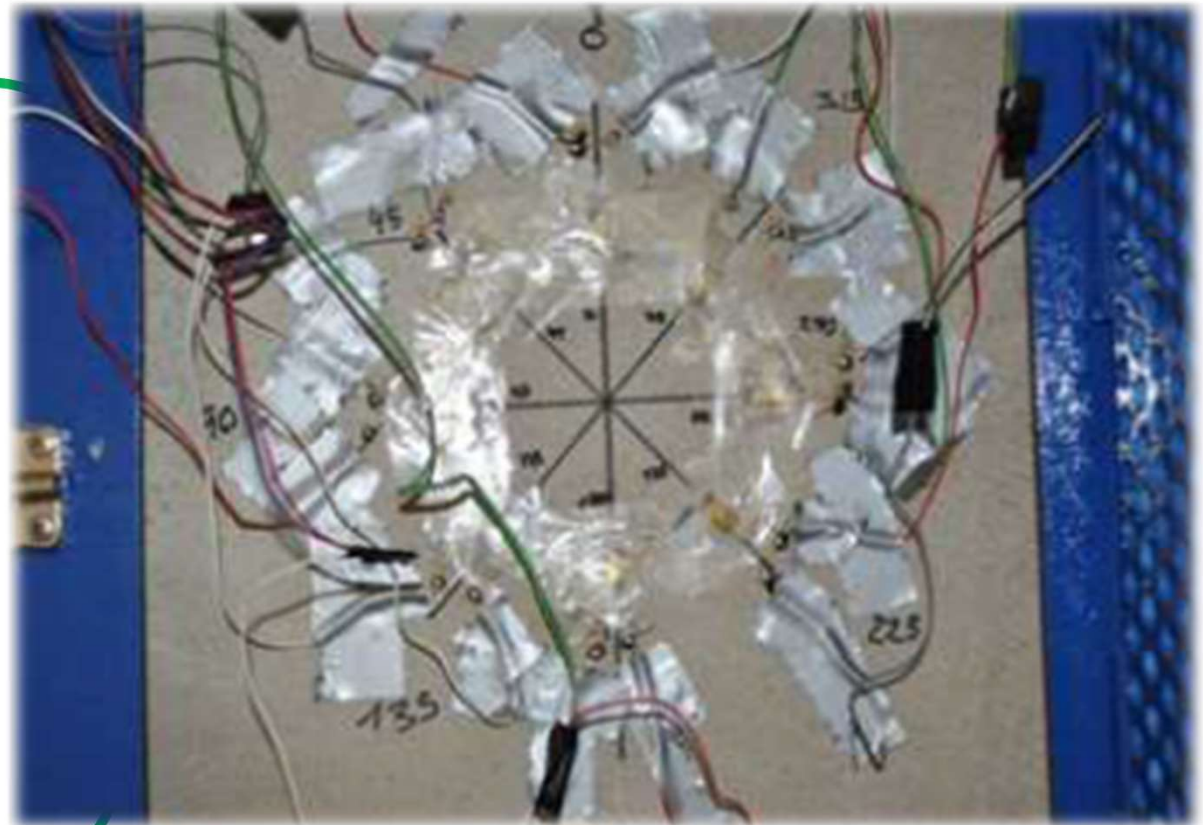
Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO STUDI E RICERCHE

Hole Drilling Strain-Gage Method

Applicazione a materiali litoidi / cls

- Chiesa San Giacomo, Anversa B
- Cattedrale di Tarragona E
- Dimensioni foro: $\varnothing 30$
- No procedura a step
- 8 estensimetri - 4 coppie anziché 3
- N.B.: solo 3 direzioni sono indipendenti
4 terne disponibili



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO
STUDI E RICERCHE



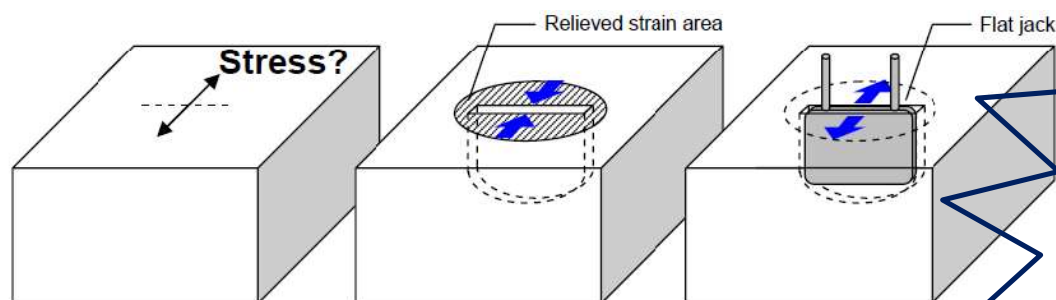
Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Slot Stress Method

Creazione per taglio di un'area di rilascio e misura deformazione nell'area alleviata. La tensione dipende dalle proprietà elastiche del materiale e dalla geometria del taglio.

Minimizzare gli scarti nella geometria del taglio \Rightarrow fori alle estremità

E_c variabile: conoscere le proprietà del materiale, \Rightarrow martinetto piatto



Applicabile con
tranquillità su
elementi destinati
alla demolizione

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO
STUDI E RICERCHE



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

TENSION RELEASE TECHNIQUE

**SI PRATICANO 4 TAGLI ISOLANDO UN
CAMPIONE TRONCO PIRAMIDALE
IL TAGLIO INTERESSA DI FATTO QUASI
ESCLUSIVAMENTE IL COPRIFERRO**



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

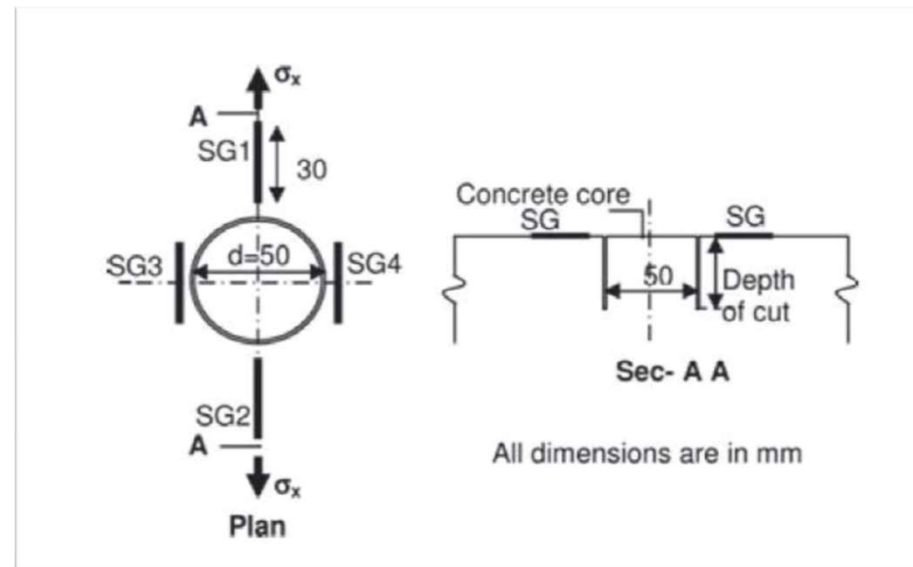


Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO STUDI E RICERCHE

Core Drilling Method

Gli spostamenti che si verificano localmente attorno al foro ad ogni incremento sono correlati alle tensioni in sito mediante l'uso di coefficienti di influenza (IF)
Misure affette da variazione durante il carotaggio.



- Il carotaggio $\varnothing 50$ mm non consente di disporre estensimetri all'interno.
- Il gradiente delle deformazioni è importante.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

LA SPERIMENTAZIONE: SIMULAZIONE DI PROVE DI RILASCIO

ORGANIZZAZIONE DELLA ATTIVITÀ

- a. Modellazione EF pannelli in c.a. (anima trave c.a.p.)
 - Simulare prove di rilascio
 - Studiare l'influenza di diametro e posizione.
- b. Progettazione e Realizzazione campioni
- c. Esecuzione di prove in laboratorio:
 - c1. messa in carico del pannello, con rilevazione delle deformazioni indotte
 - c2. esecuzione di carotaggio, misurazione deformazioni;
 - c3. scarico del pannello con rilevazione deformazioni.
- d. Confronto numerico sperimentale con eventuale individuazione di coefficienti correttivi.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA
LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE: LA RICERCA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Modellazione EF pannelli in c.a. (rif.:
anima trave precompressa ...)

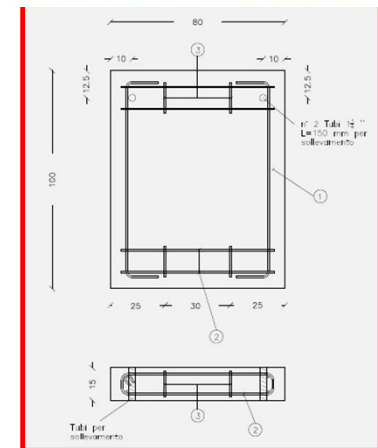
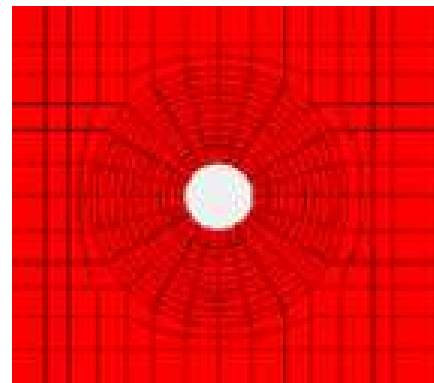
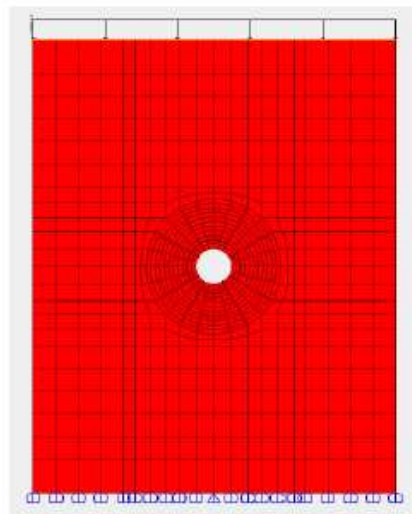


Scelte:

dimensioni [mm]: 800x1000 $s=150$

Peso 3.0 kN; $A= 120000 \text{ mm}^2$

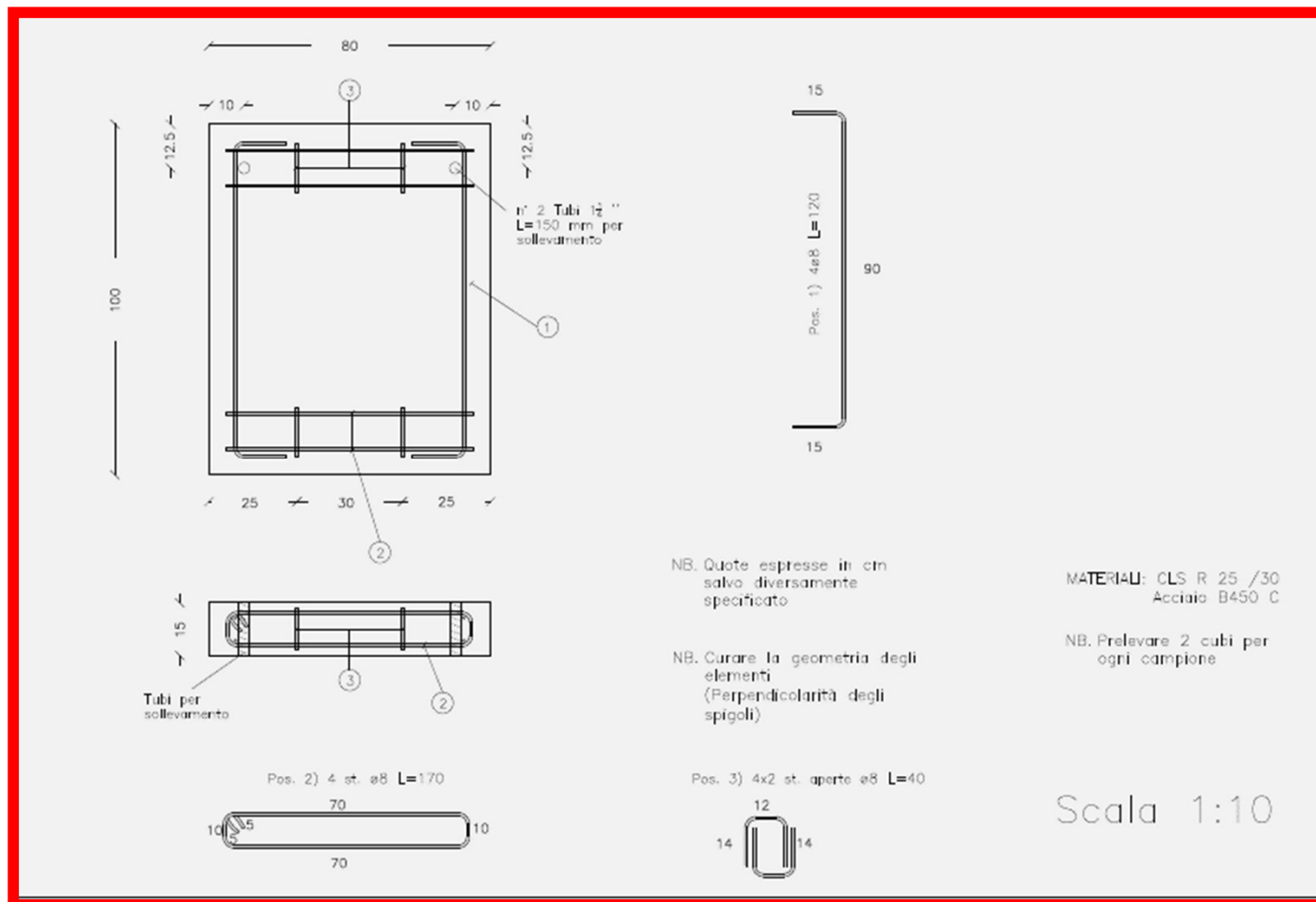
$\sigma_v = 10 \text{ N/mm}^2$ $F= 1200 \text{ kN}$



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AI CIS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



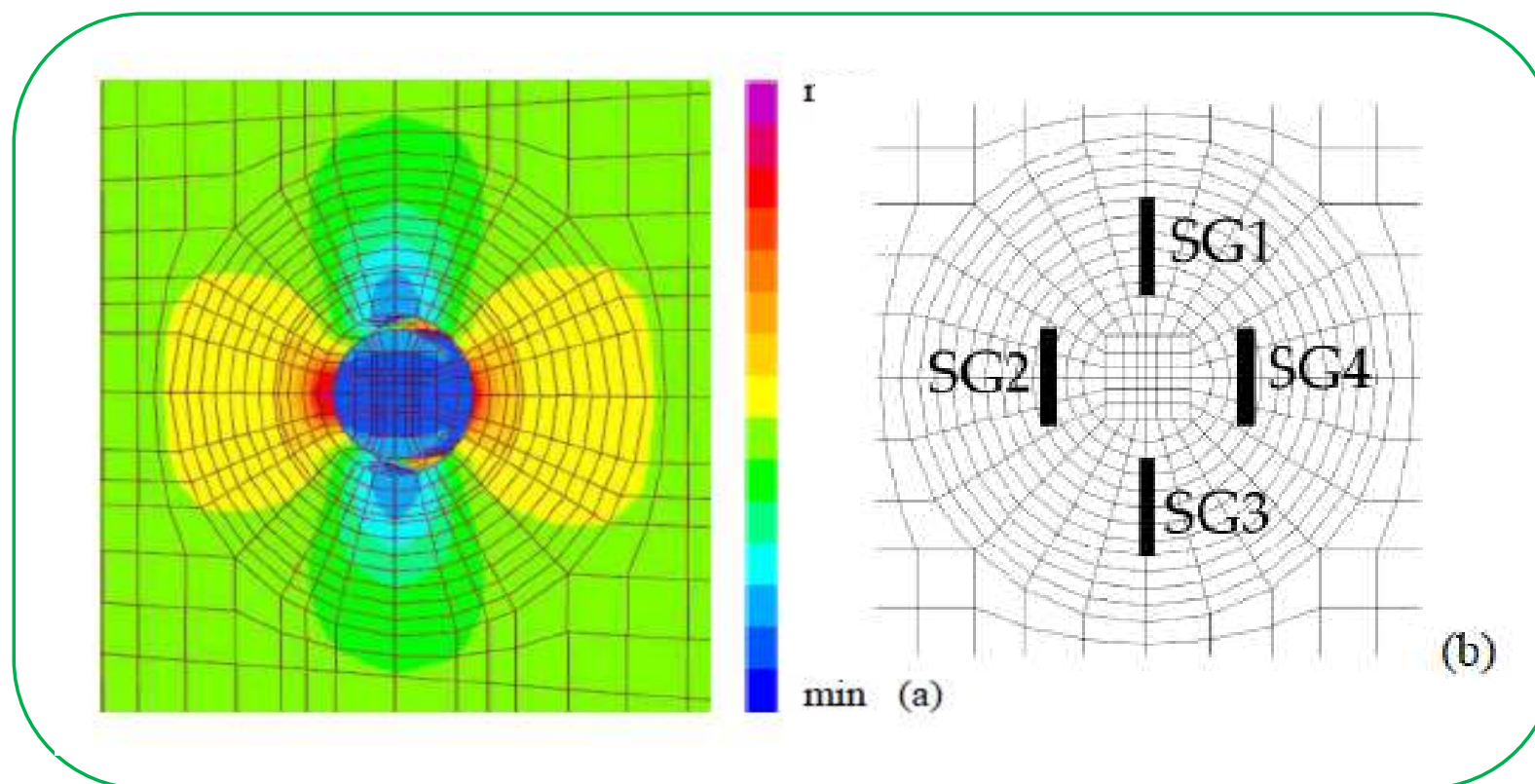
Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



FACCIA ANTERIORE

Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

ATTREZZATURA DI PROVA

Conferimento del carico:

Macchina di prova oleodinamica - F_{\max} 5000 kN

Travi di ripartizione HEB360 costolate

Misura delle deformazioni verticali del provino

4 trasduttori di spostamento estensimetrici a ponte intero

Misure locali: estensimetri elettrici $L = 60$ mm

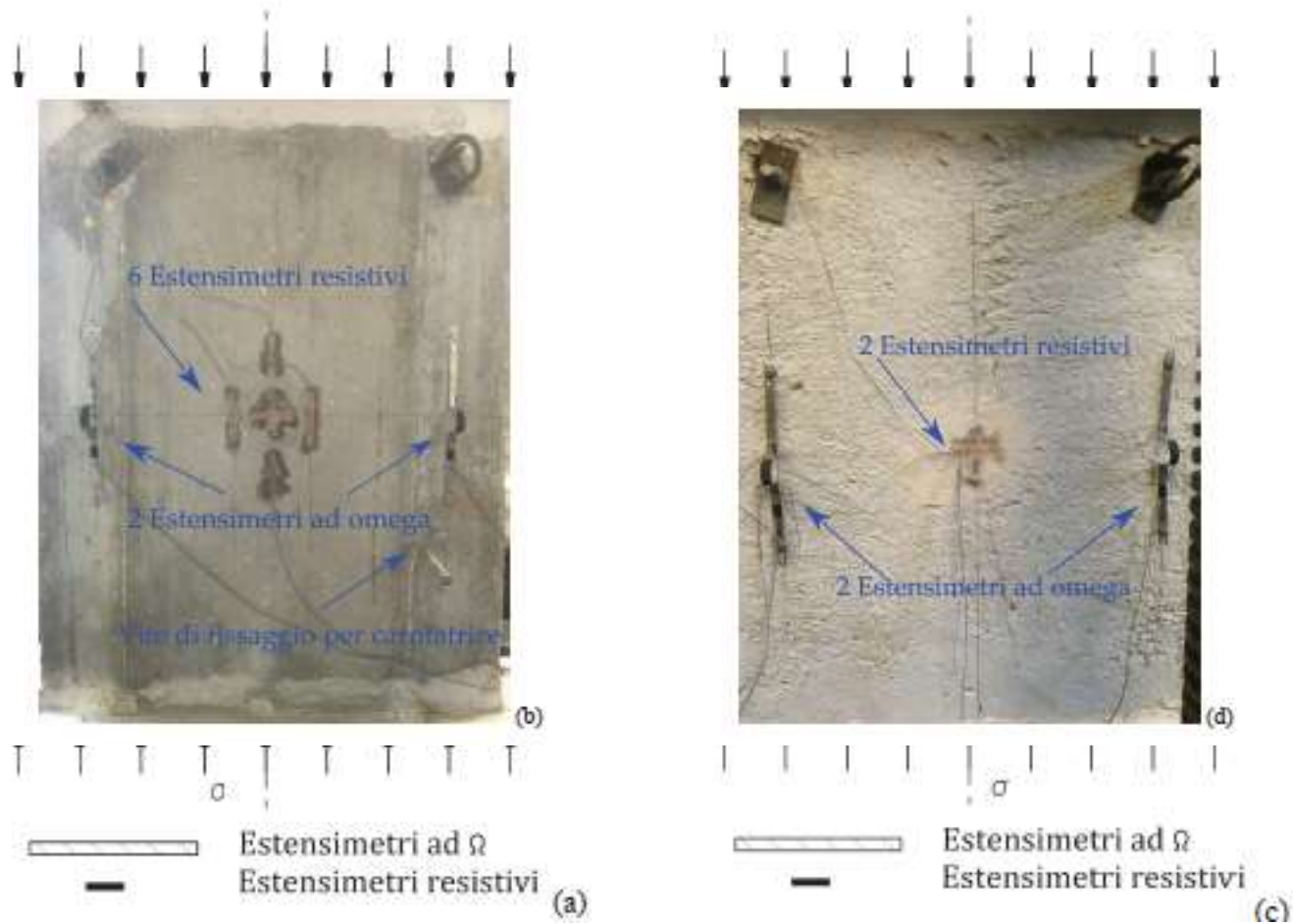
Carotatrice dotata di rilevazione dell'avanzamento della carotatrice - Trasduttore di spostamento resistivo a filo (F.S.: 500 mm)

Centralina di acquisizione dati National Instruments

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE: LA RICERCA



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

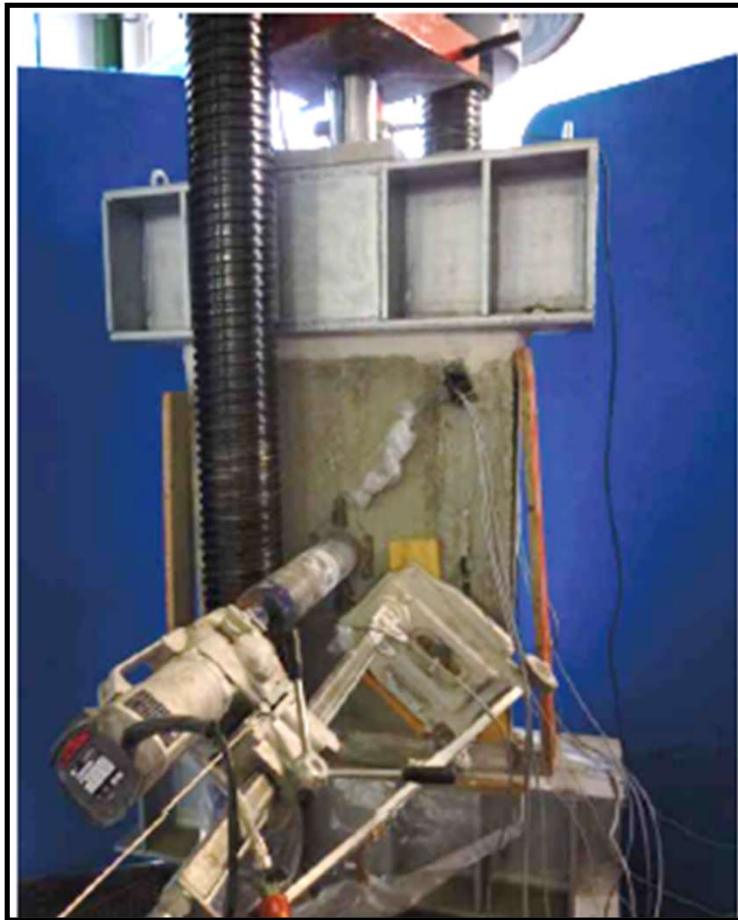
PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE LA RICERCA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



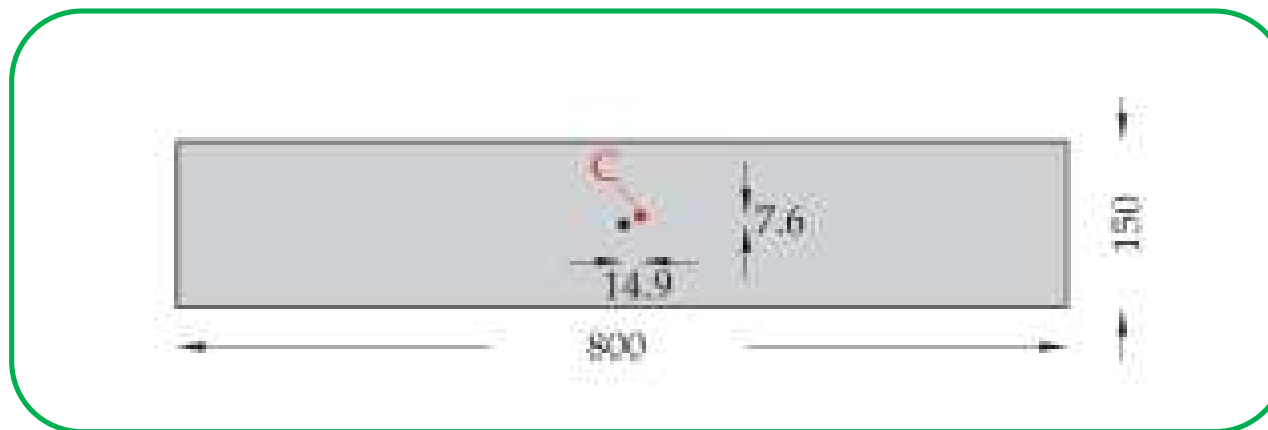
Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

PROBLEMA...:

IL CARICO NON RISULTAVA CENTRATO

**DIFETTOSITA' DI GEOMETRIA E DI
MONTAGGIO (LIMITATE)**

**IL CENTRO GEOMETRICO DELLA SEZIONE DEL PANNELLO NON
CORRISPONDE AL CENTRO DI RIGIDEZZA (IRREGOLARITA' CLS)**



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

LA MISURA DEL RILASCIO TENSIONALE NEL CALCESTRUZZO STUDI E RICERCHE



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



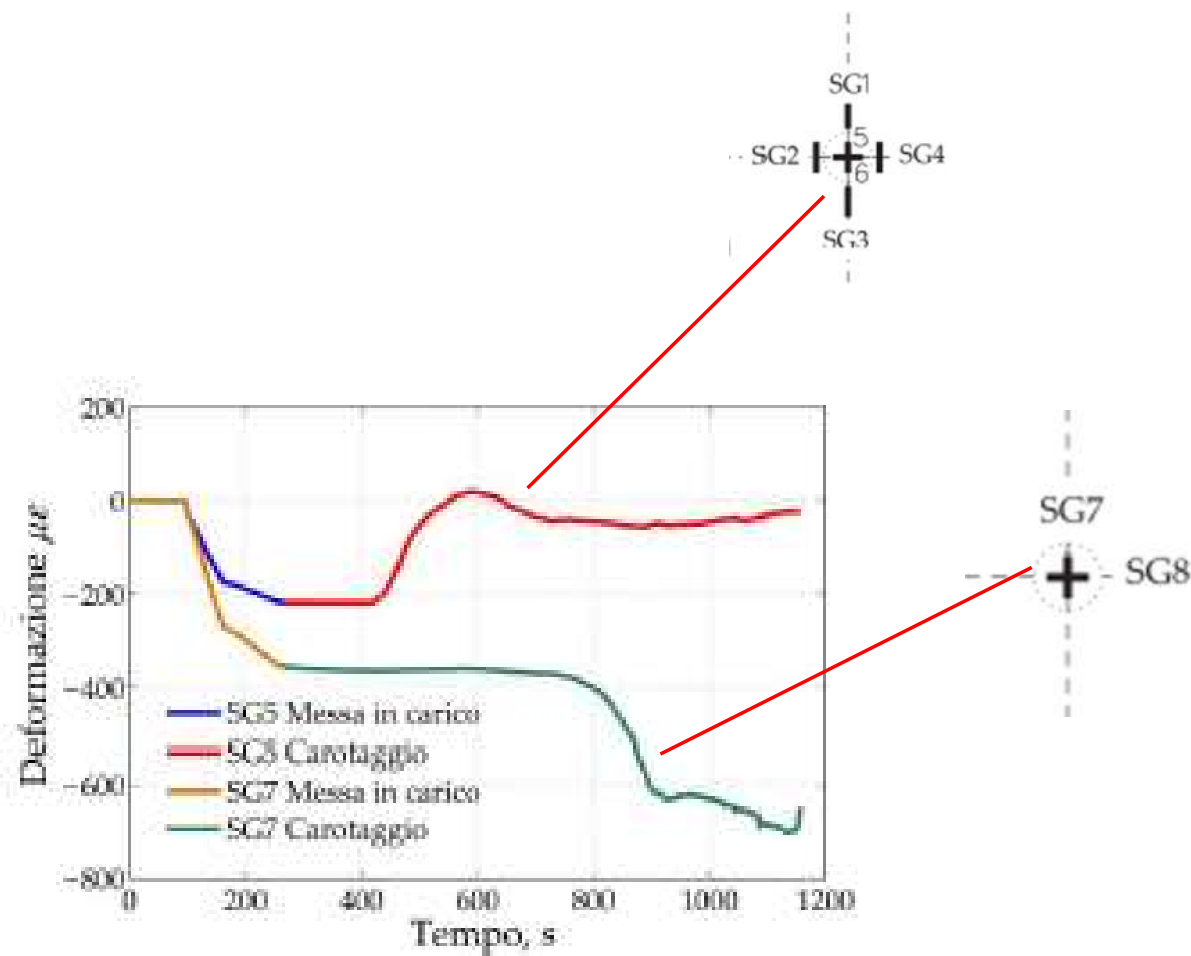
Gli effetti termici

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

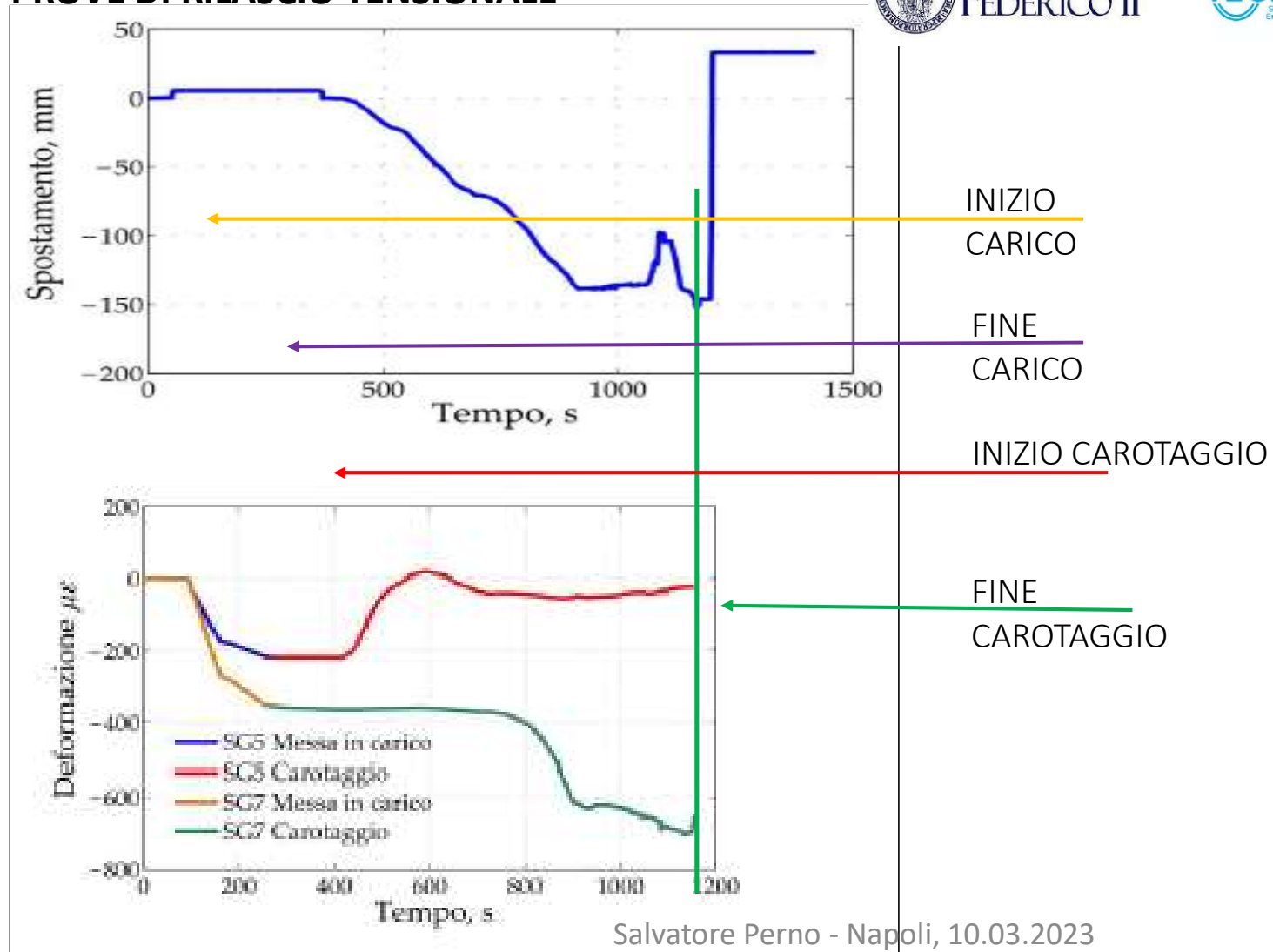
PROVE DI RILASCIO TENSIONALE



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



DIFFERENZE FRA RISULTANZE SPERIMENTALI E VALORI ATTESI

ESTENSIMETRI INTERNI // +0,2%

ESTENSIMETRI INTERNI \perp +9,8%

ESTENSIMETRI ESTERNI \cong 25%

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

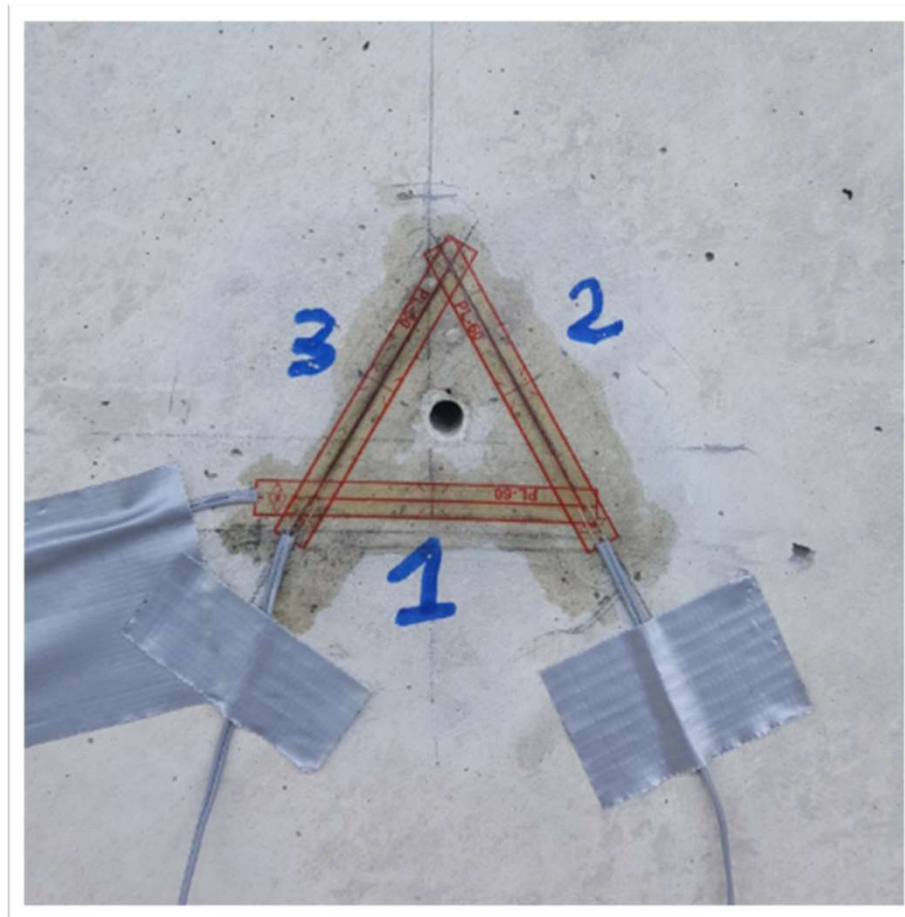
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Nel caso in cui non si conoscano le direzioni principali, la disposizione di tre estensimetri in maniera da creare di fatto una rosetta estensimetrica consente di rilevare le deformazioni principali e risalire quindi alle tensioni principali.

La sperimentazione in Laboratorio è ripresa.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



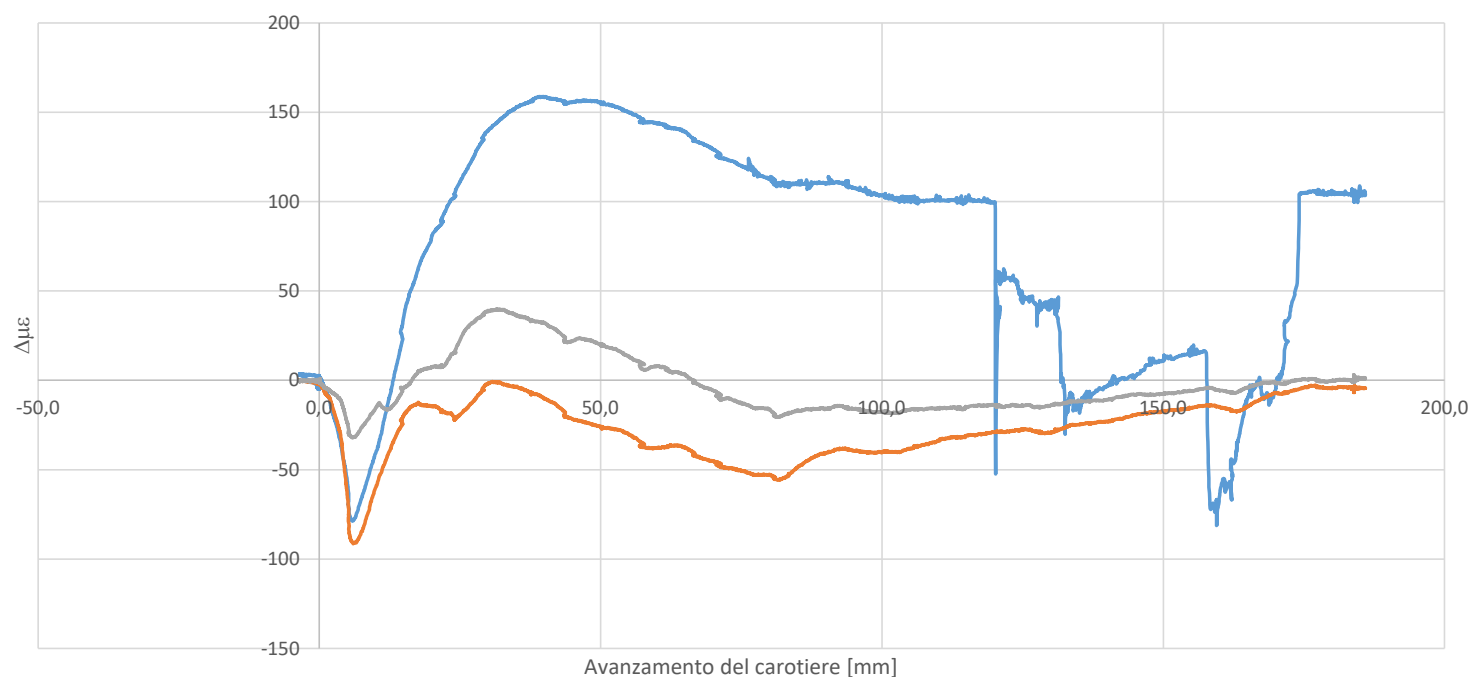
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

ESEMPIO DI RILEVAZIONE IN SITU

Carotaggio T1 B



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE SUI FILI DELL'ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE

OBIETTIVO: VERIFICA DELLA TENSIONE RESIDUA
NELL'ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE

MODALITA': SI APPLICA UN ESTENSIMETRO SU UN FILO DI
ARMATURA.
SI TAGLIA IL FILO SOTTO MISURA
LA REGISTRAZIONE DELLA DEFORMAZIONE E'
CONTINUA DURANTE IL TAGLIO DEL FILO

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

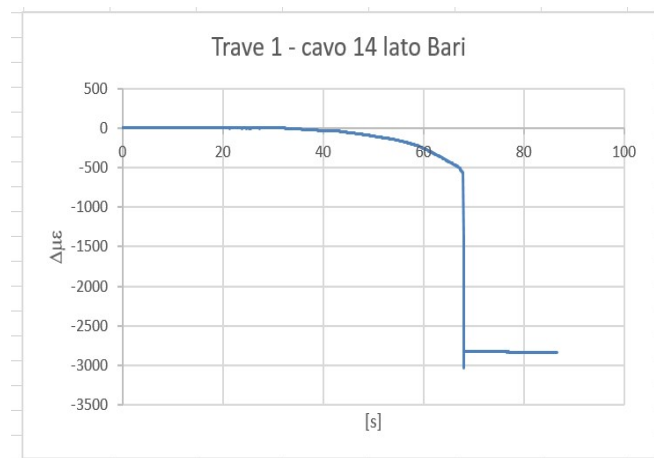


Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE SUI FILI DELL'ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE

OBIETTIVO: VERIFICA DELLA TENSIONE RESIDUA NELL'ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE

16 PROVE IN CORRISPONDENZA DI SEZIONI PRESTABILITE. LA REGISTRAZIONE DELLA DEFORMAZIONE E' CONTINUA DURANTE IL TAGLIO DEL FILO



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

Trave	Cavo	Δμε	Δσ
		[μm/m]	[N/mm ²]
T4	8N	-3291	-691
T4	7B	-3446	-724
T4	2N	-3365	-707
T4	2B	-3593	-755
T3	8N	-3222	-677
T3	7B	-3198	-672
T3	2N	-357	-75
T3	2B	-3289	-691
T2	8N	-3111	-653
T2	7B	-3028	-636
T2	12N	-	-
T2	12B	-3778	-793
T1	8N	-2788	-585
T1	7B	-3114	-654
T1	14N	-3326	-698
T1	14B	-2837	-596

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE SUI FILI DELL'ARMATURA DI PRECOMPRESSIONE



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

DUBBI:

- E' evidente che il riscontro delle prove sperimentali ha lo scopo di valutare, attraverso rilevazioni puntuali, se lo stato di precompressione atteso sia effettivamente presente nell'elemento in esame.
- Spesso le risultanze delle prove sul cls e sull'armatura appaiono non allineate con ragionevoli attese, a volte fra loro anche contrastanti al punto da sollevare dubbi sulla affidabilità delle prove stesse

DETENSIONAMENTO DELL'ACCIAIO

DUBBI:

- Quanto un filo è rappresentativo della pretensione?
- Nella sezione indagata, le perdite istantanee quanto valgono?
Si può ovviare con una seconda misura sullo stesso cavo in sezione simmetrica (Doppia misura)
- Nel caso di trefoli quanto l'avvolgimento altera la misura?
- Quanto il rientro misurato può essere rappresentativo e di cosa?

DEENSIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO

DUBBI:

- Quanto una misura di variazione di deformazione può essere «sporcata» dagli effetti di variazione di temperatura dovuta al taglio?
- Una attesa di stabilizzazione della temperatura troppo lunga può comportare derive di segnale nel caso di estensimetri elettrici, quindi ulteriori problemi.
- Quand'anche non avessi errori di rilevazione o alterazioni del valore stesso, quanto una misura puntuale del valore di deformazione può essere rappresentativa di un valore medio nello spessore, ossia del valore ricercato?

DETENSIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO – DUBBI

[NTC 2018 – 11.2.10.6] **RITIRO**

La deformazione totale da ritiro si può esprimere come:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad [11.2.6]$$

dove:

ϵ_{cs} è la deformazione totale per ritiro

ϵ_{cd} è la deformazione per ritiro da essiccamento

ϵ_{ca} è la deformazione per ritiro autogeno.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

DETENSIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO – DUBBI

Il valore medio a tempo infinito della deformazione per ritiro da essiccamento:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0} \quad [11.2.7]$$

può essere valutato mediante i valori delle seguenti Tabelle 11.2.Va ed 11.2.Vb in funzione della resistenza caratteristica a compressione, dell'umidità relativa e del parametro h_0 :

Tab. 11.2.Va – Valori di ε_{c0}

f_{ck}	Deformazione da ritiro per essiccamento (in ‰)					
	Umidità Relativa (in %)					
	20	40	60	80	90	100
20	-0,62	-0,58	-0,49	-0,30	-0,17	+0,00
40	-0,48	-0,46	-0,38	-0,24	-0,13	+0,00
60	-0,38	-0,36	-0,30	-0,19	-0,10	+0,00
80	-0,30	-0,28	-0,24	-0,15	-0,07	+0,00

Tab. 11.2.Vb – Valori di k_h

h_0 (mm)	k_h
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{c0}$$

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II

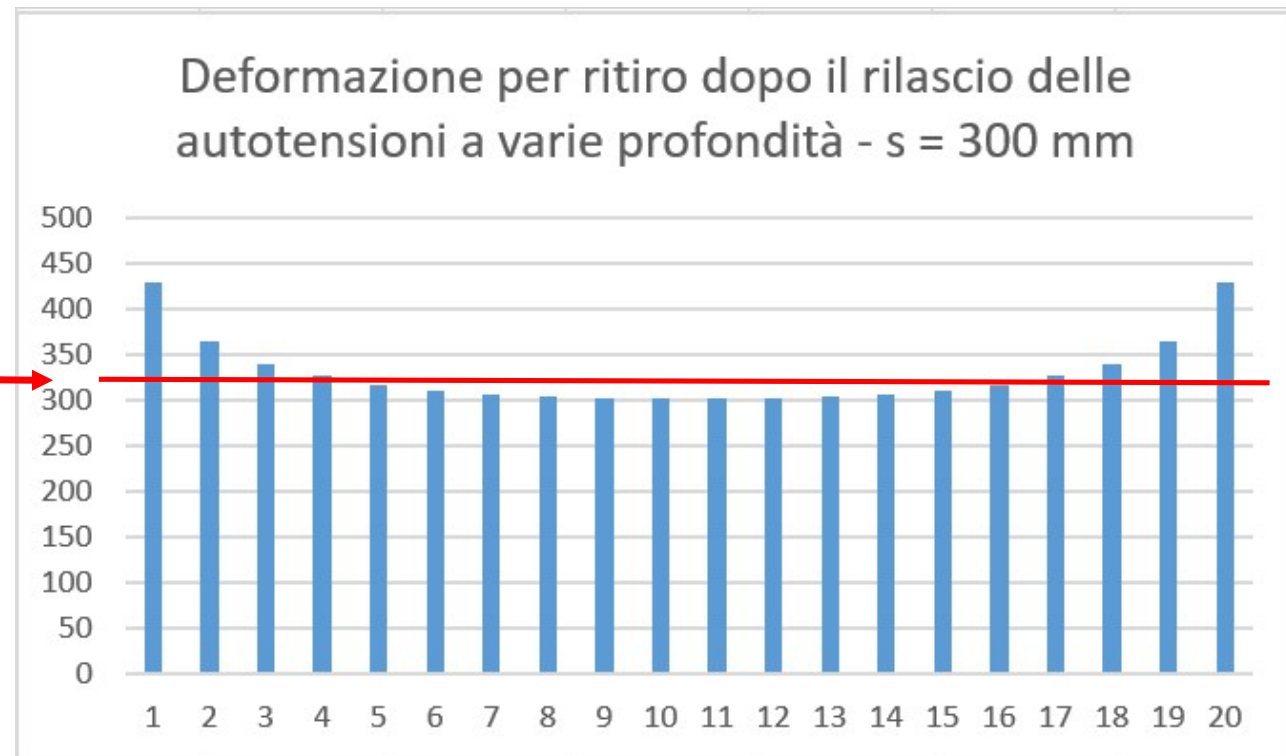


Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

DETENSIONAMENTO DEL CALCESTRUZZO – DUBBI

$$\varepsilon_{cd\infty} = a x^m$$

Valor medio



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

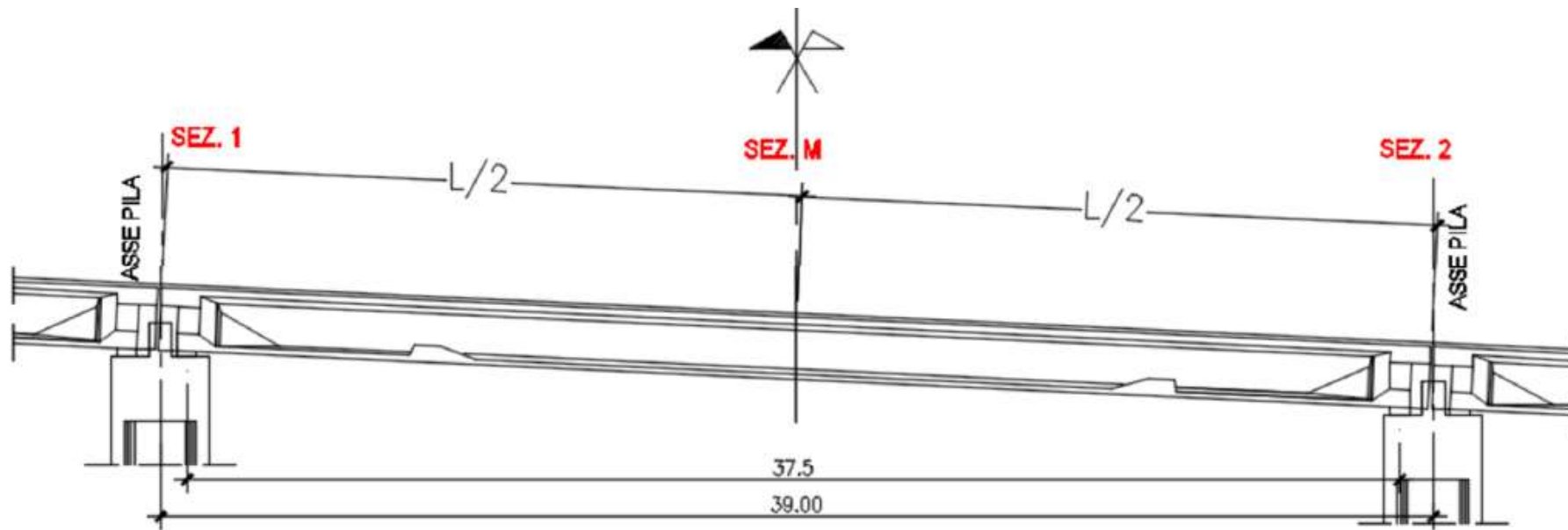


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

L'utilizzo delle misure in un caso reale



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

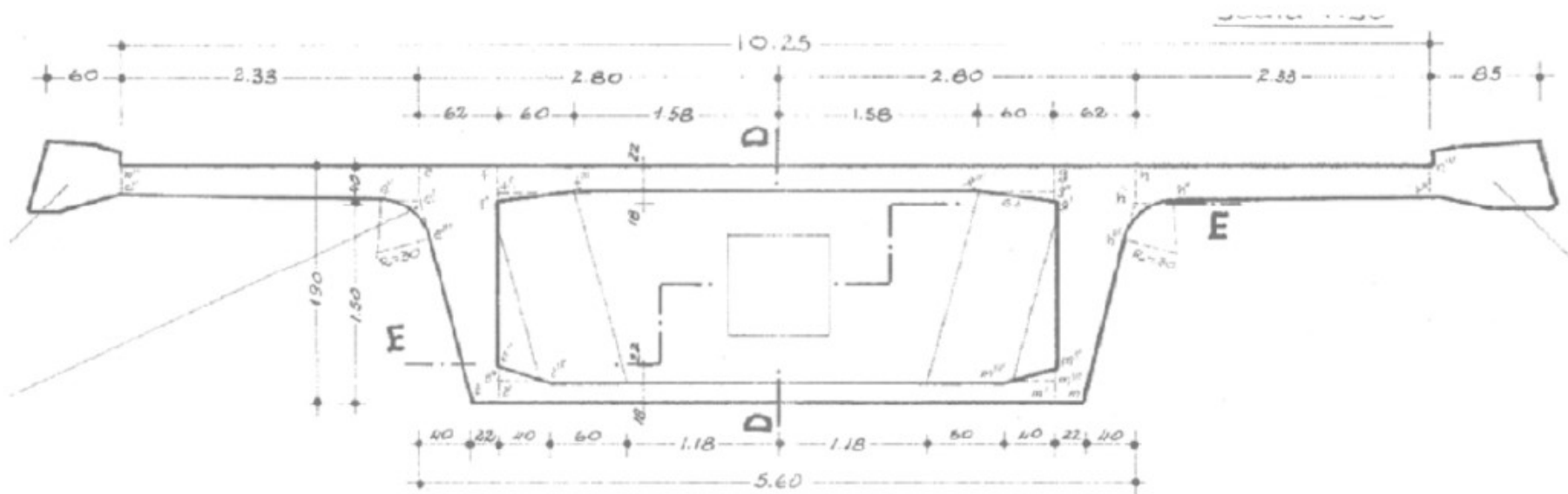
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



Ogni campata è precompressa con 22 cavi post-tesi $42\phi 7$ dei quali: 16 ad andamento parabolico nelle anime ancorati nelle testate della trave e 6 ad andamento rettilineo in controsoletta (2 ancorati alle estremità e 4 ancorati a circa 7 m dall'asse degli appoggi).

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

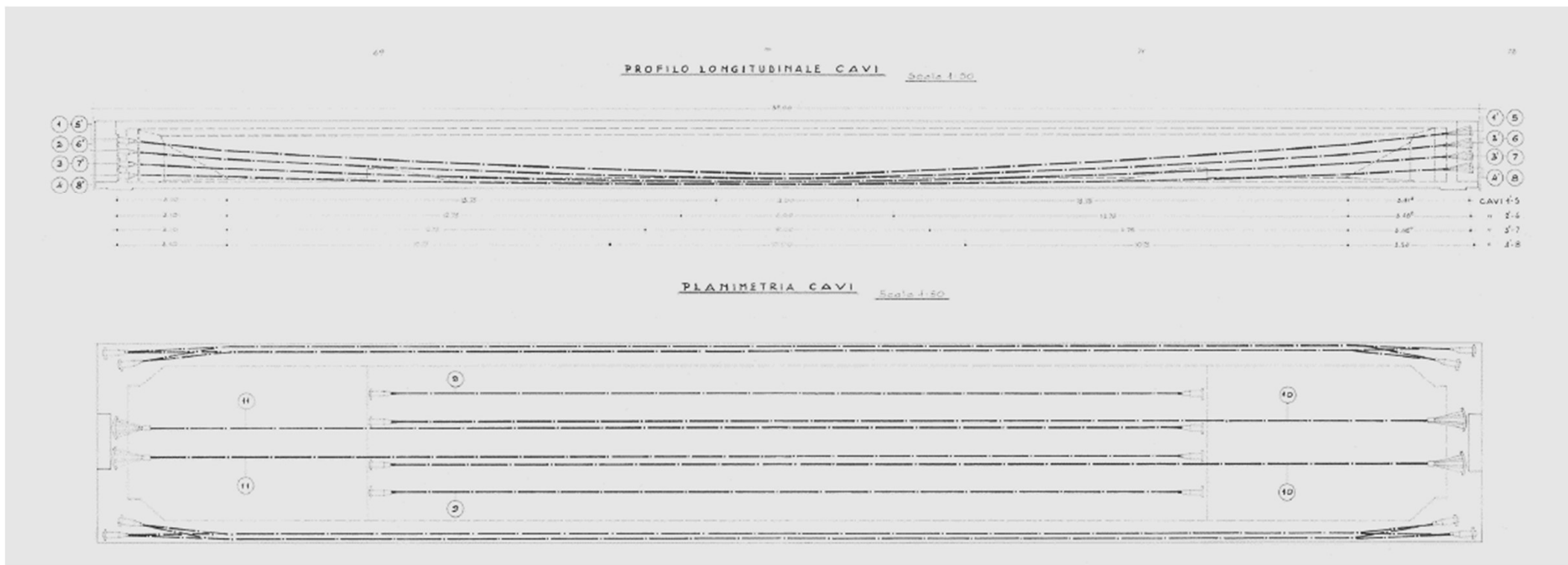
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

.1 Ipotesi di progetto

Dall'analisi della relazione di calcolo

- La tesatura è prevista in due fasi: in una prima fase tesatura dei 16 cavi parabolici e dei 2 cavi di controsoletta ancorati in testata, in seconda fase tesatura dei rimanenti 4 cavi di controsoletta ancorati in campata.
- I cavi di precompressione nella sezione di mezzeria, a cadute scontate, dovrebbero avere una tensione di 863.29 MPa, corrispondente ad una perdita percentuale del 32.3% rispetto alla tensione iniziale al martinetto.

Nella sezione di mezzeria, in condizioni di esercizio, a ponte scarico agiscono le seguenti tensioni ai lembi estremi:

$$8.579 \text{ N/mm}^2 \text{ (inf)} \quad 4.343 \text{ N/mm}^2 \text{ (sup)}$$

All'applicazione dei carichi accidentali di progetto, le stesse tensioni diventano:

$$-0.003 \text{ N/mm}^2 \quad 8.573 \text{ N/mm}^2$$

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Si nota quindi come le ipotesi progettuali prevedano il raggiungimento della decompressione in corrispondenza dell'azione dei massimi carichi accidentali

Risultanze di collaudo

Il valore medio su tutte le campate provate della freccia misurata a pieno carico è stato pari a

$$f_{coll} = 29.37 \text{ mm}$$

Il modulo elastico equivalente determinato in fase di collaudo è di 40.604 GPa relativamente ad un momento d'inerzia di 2.37478 m^4 che corrisponde ad una rigidità flessionale equivalente

$$EI_{coll} = 96.425 \text{ GN m}^2$$

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

INDAGINI SUI MATERIALI ESEGUITE

- n. 2 carotaggi per il prelievo di campioni di calcestruzzo dell'impalcato;
- n. 4 carotaggi per il prelievo di campioni di calcestruzzo delle pile;
- n. 2 prove di detensionamento di fili di precompressione;
- n. 2 ispezioni video-endoscopiche dell'interno del cassone finalizzate a verificare la presenza di umidità. Il video-endoscopio è stato introdotto dapprima in un foro per lo scolo delle acque situato nella controsoletta a circa 2.50 m dall'asse della pila 14S e successivamente in un foro praticato attraverso la controsoletta a circa 10.0 m dall'asse della pila 14S. Nelle vicinanze del foro della prima ispezione è visibile un'area in cui è stato espulso il copriferro con esposizione di armature corrose. Entrambe le ispezioni hanno però evidenziato l'assenza di ristagno di acque all'interno del cassone;
- n. 7 ispezioni tramite Ferroskan per l'individuazione dei cavi di precompressione;
- n. 4 prelievi di acciaio per armatura lenta;
- n. 1 prelievo di acciaio armonico.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

C4		
	<p>Data prelievo: 28.02.2019 Posizione: 9.30 m dall'asse pila 13S sulla parete sinistra del cassone a 1.20 m dall'intradosso</p>	

I valori medi delle principali grandezze misurate sono:

$$f_{cm,is} = 43.25 \text{ MPa};$$

$$f_{ctm,is} = 3.20 \text{ MPa};$$

$$E_{cm,is} = 29.71 \text{ GPa};$$

$$\rho_{cm,is} = 2205 \text{ kg/m}^3;$$

$$v_{cm,is} = 4092 \text{ m/s};$$

I risultati delle prove eseguite sui campioni di calcestruzzo sono sintetizzati nella Tabella 1.

ID	Prova *	Peso	Altezza	Diametro	H/D	Densità	Tensione di rottura	Modulo elastico			Ultrasuoni		Carbonatazione	
		[kg]	[mm]	[mm]	[#]	[kg/m³]	[MPa]	Valore	Limiti di calc.	Rampa				
C1	ME	2.790	186.0	93	2.00	2208	-	28.96	4.53	15.00	0.25	45.7	4070	35
	C1	1.435	95.0	93	1.02	2224	42.17	-	-	-	-	-	-	
	TI	1.310	88.5	93	0.95	2179	3.64	-	-	-	1.20	-	-	
C4	ME	2.785	185.5	93	1.99	2210	-	30.46	4.55	15.00	0.25	45.1	4113	25
	C1	1.500	99.0	93	1.06	2230	46.49	-	-	-	-	-	-	
	TI	1.235	83.5	93	0.90	2177	3.46	-	-	-	1.20	-	-	

* ME = Modulo elastico ed ultrasuoni su provino 2:1; C1 = Compressione su provino 1:1; C2 = Compressione su provino 2:1; TI = Trazione indiretta

** R= campione rettificato tramite spianatura delle facce, C= campione rettificato tramite cappatura

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

In primo luogo, come emerso da una verifica di natura chimica in laboratorio, il calcestruzzo è stato confezionato anche con inerti calcarei. Il punto 3.1-[EC2-1.1] raccomanda, in caso di inerti calcarei, di ridurre del 10% il valore del modulo elastico stimato. In secondo luogo, da una sommaria ricognizione storica appare probabile che il calcestruzzo abbia subito un processo di maturazione a vapore. Questo tipo di maturazione può essere responsabile di una certa porosità, visibile ad occhio nudo, che può avere contribuito a conferire al calcestruzzo una minore rigidità ed una minore densità, come confermato anche dalle NTC18 che, infatti, ritengono non applicabile la formula 11.2.5 ai calcestruzzi maturati a vapore. La maturazione a vapore può essere una concausa anche di maggiori perdite di tensione nei cavi di precompressione.



Fig. 9 Dettaglio della porosità visibile sulla carota 1

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Sono state eseguite due prove di detensionamento di fili su cavi disposti sulla parete sinistra del cassone.

I cavi sono stati localizzati tramite indagine Ferroskan. Le posizioni nelle quali sono stati individuati i cavi corrispondono con buona approssimazione con quelle previste nella relazione di calcolo di progetto. Da tale confronto emerge che la prova F1 ha interessato un filo del cavo 1 ad una distanza di 7.15 m dall'ancoraggio attivo e la prova F2 un filo del cavo 6 a 7.35 m dall'ancoraggio attivo.



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

prova	cavo	precompressione di progetto	tensione misurata	stima tensione in mezzeria
		[MPa]	[MPa]	[MPa]
F1	1	920.2	788.1	737.4
F2	6	911.0	716.6	675.4

Tab. 5 Tensioni di precompressione misurate

I due valori stimati per la precompressione residua nella sezione di mezzeria corrispondono, rispettivamente, a perdite percentuali del 42.2% e 47.0% rispetto alla tensione al martinetto, a fronte del 32.3% previsto in fase di progetto.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

PROVA DI CARICO

Scopo della Prova di carico è stato quello di applicare una distribuzione di carichi conforme allo Schema di Carico 1 di cui al punto 5.1.3.3.5-[NTC18] con intensità assunta pari al valore caratteristico.

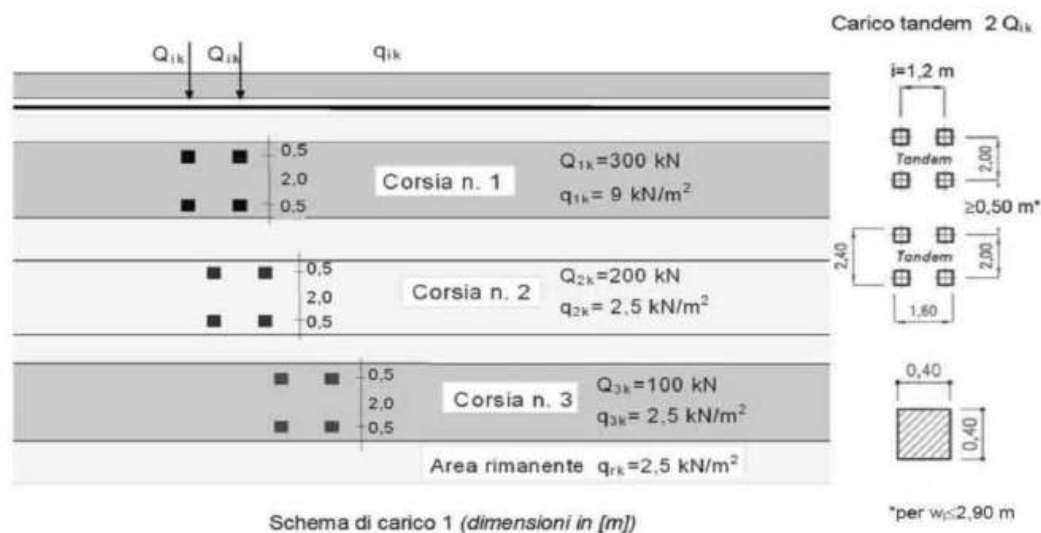


Fig. 11 Schema di carico 1 NTC18 5.1.3.3.3

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

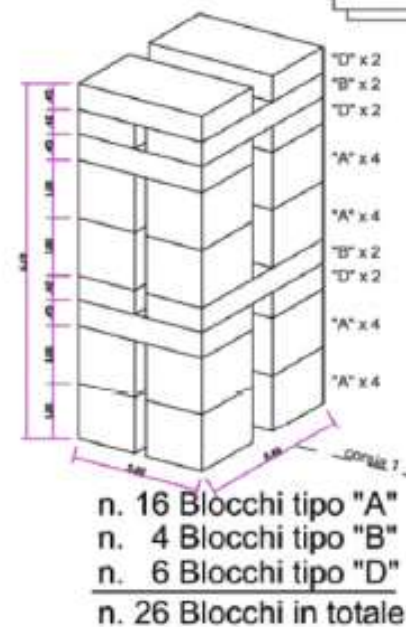
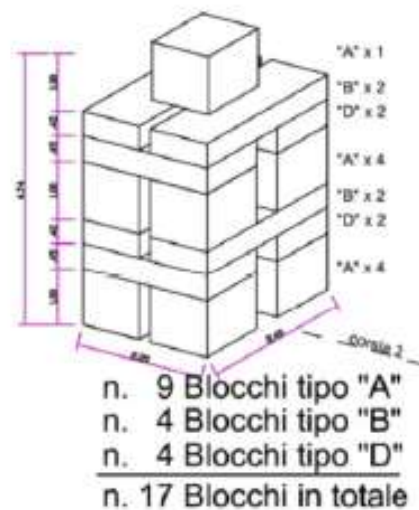
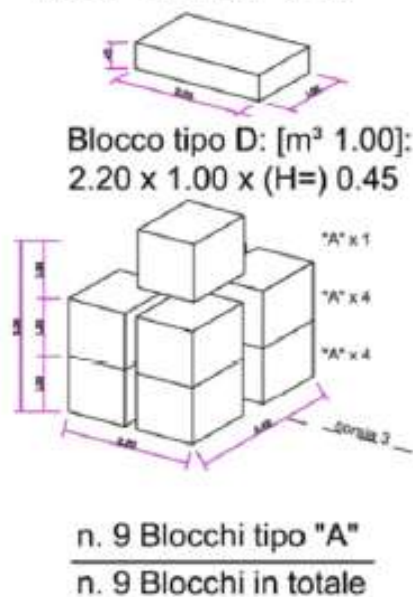
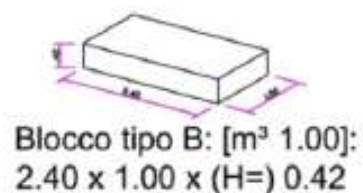
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

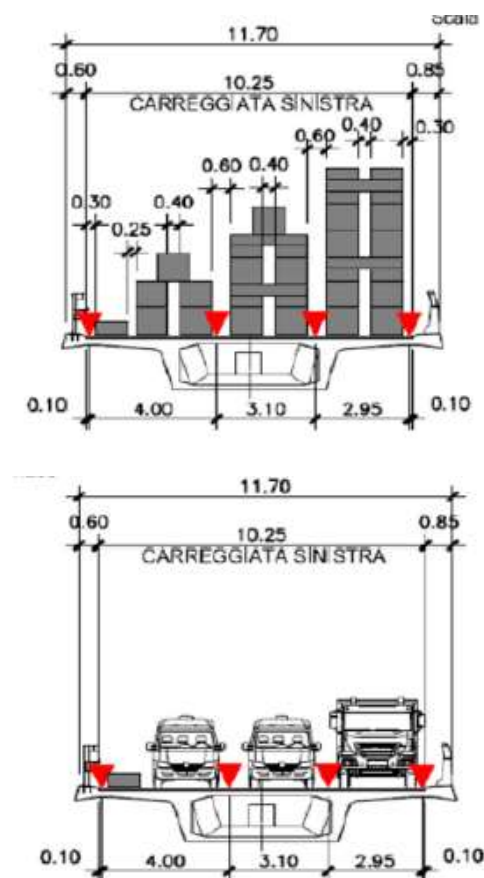


In totale:
n. 34 Blocchi tipo "A"
n. 13 Blocchi tipo "B"
n. 10 Blocchi tipo "D"

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Scala 1:200



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

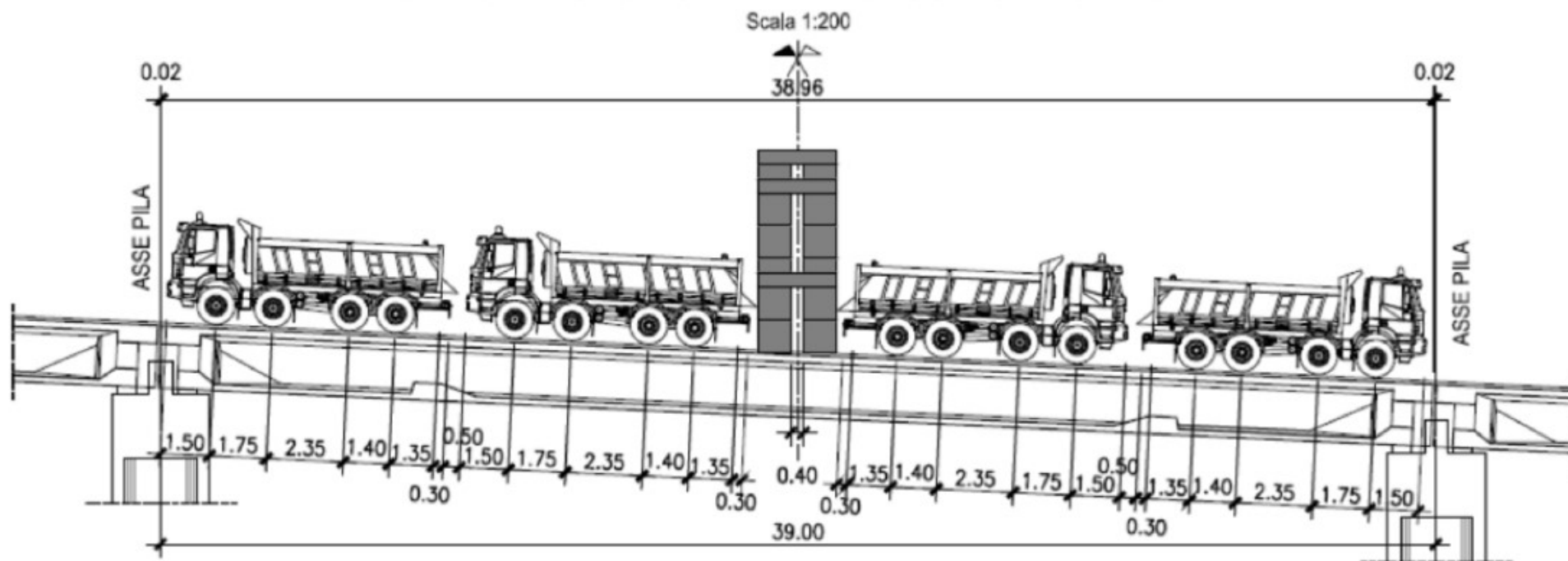


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

SEZIONE LONGITUDINALE DISPOSIZIONE CARICHI



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



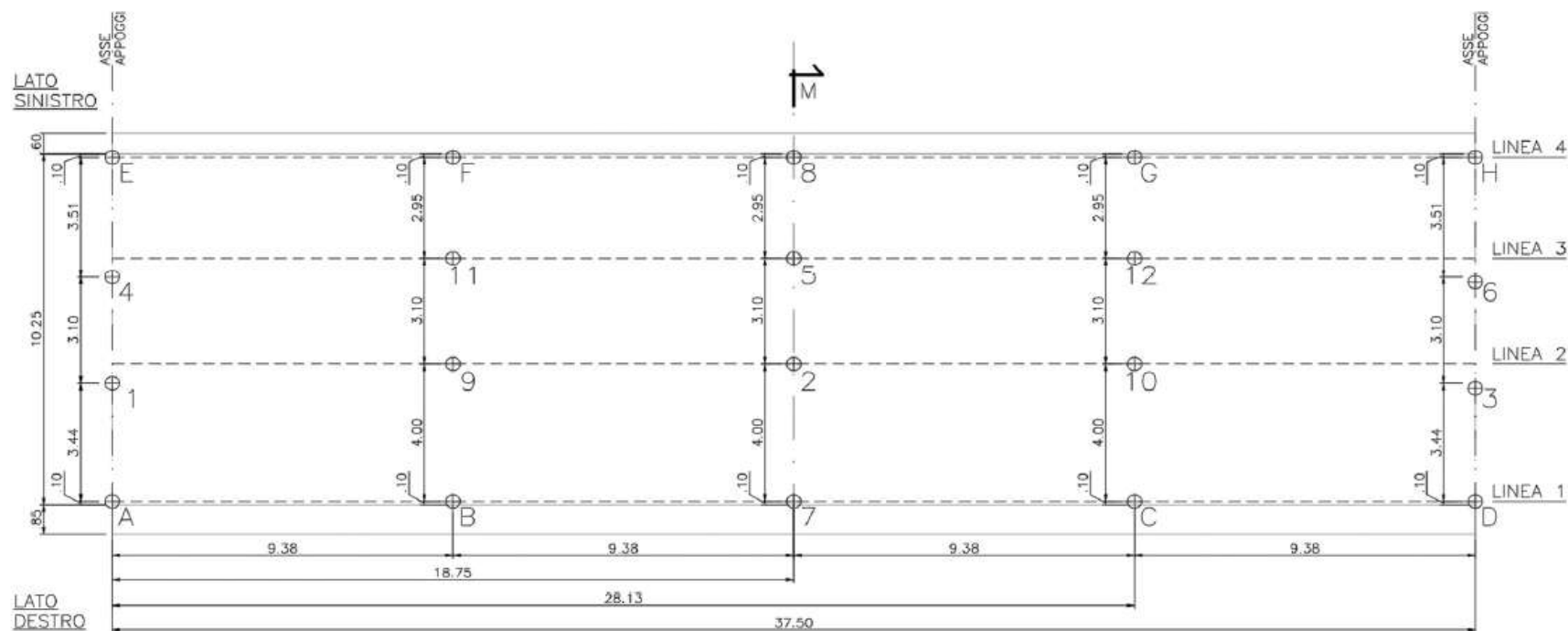
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

DISPOSIZIONE PLANIMETRICA CAPOSALDI DI LIVELLAZIONE

Scala 1:100



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

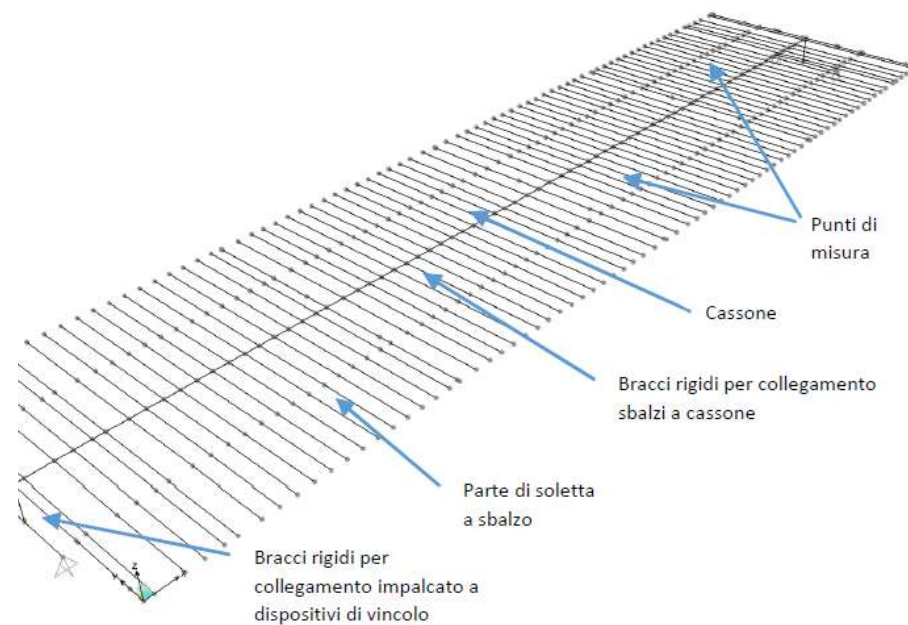


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

	Momento flettente di prova	% di M_NTC18 - frequente	% di M_NTC18 - raro	% accidentale di progetto
lettura	[kNm]			
1	0	0.0%	0.0%	0.0%
2	2723	24.0%	14.5%	15.8%
3	5899	52.0%	31.3%	34.2%
4	10347	91.2%	55.0%	60.0%
5	13069	115.2%	69.4%	75.8%
6	14204	125.3%	75.5%	82.4%
7	15447	136.2%	82.1%	89.6%
8	17489	154.2%	92.9%	101.4%
9	18046	159.1%	95.9%	104.7%
10	19289	170.1%	102.5%	111.9%



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Salvatore Perno - Napoli, 10.03.2023



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA

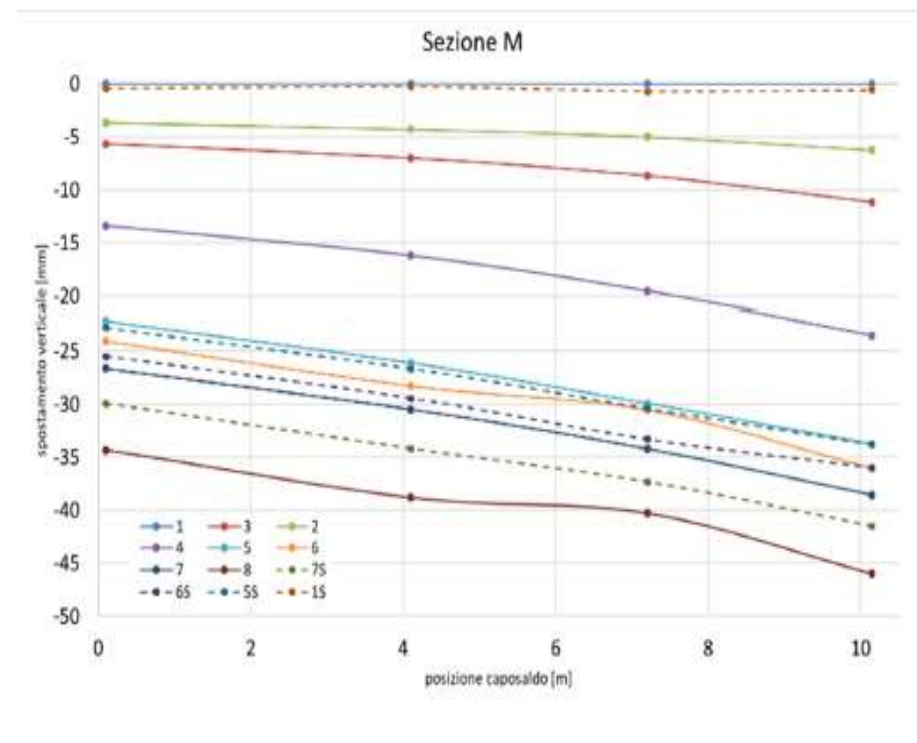
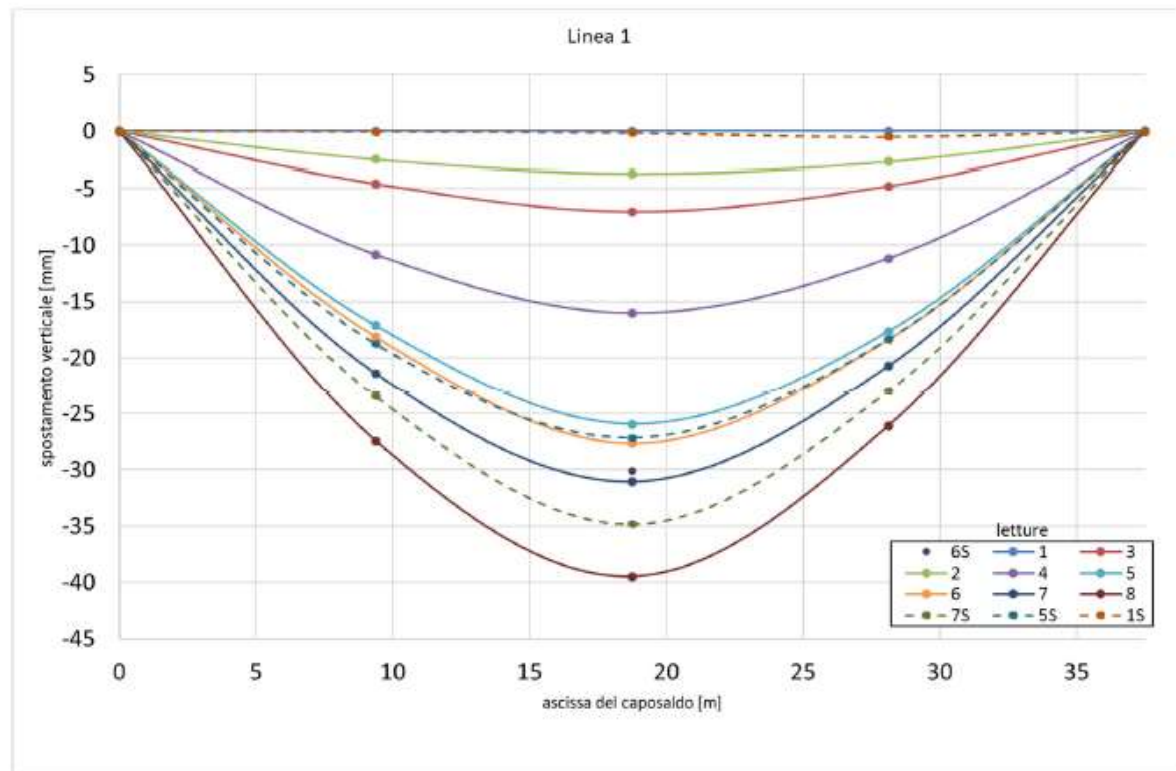


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Livellazione topografica – deformate longitudinale e trasversale



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

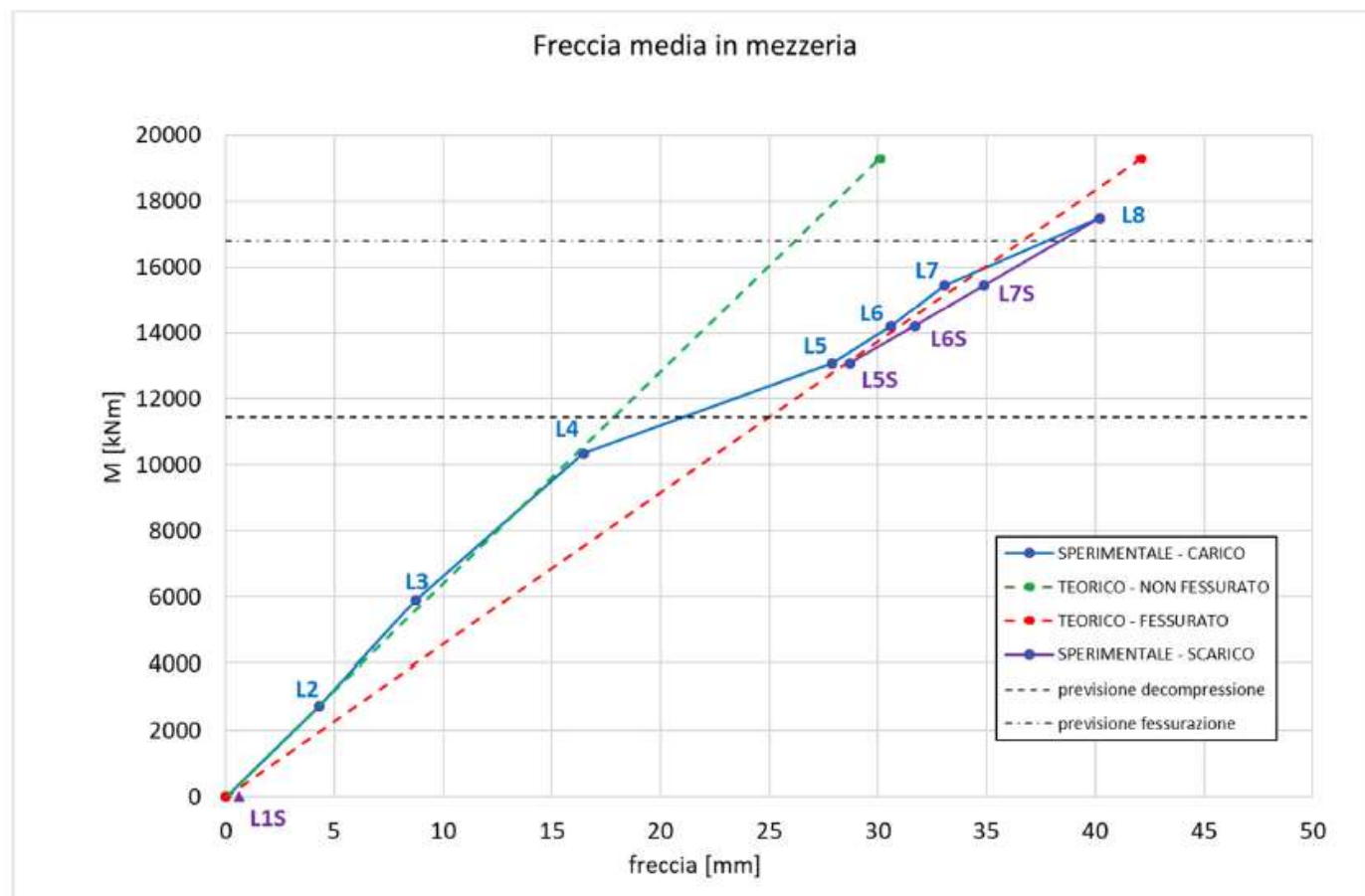
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

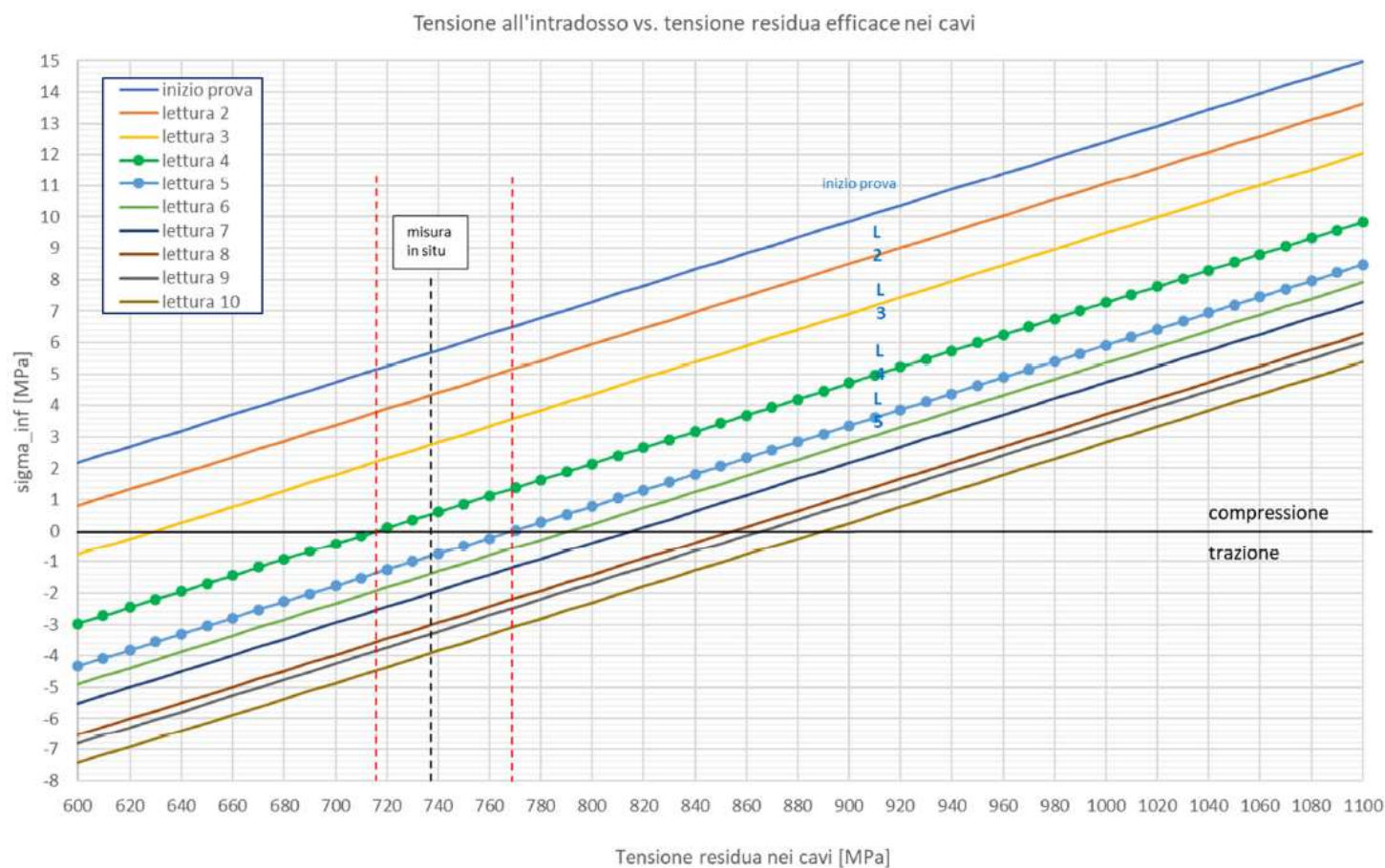
Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli



IDEATORE DELLA
RAPPRESENTAZIONE GRAFICA:
DAVIDE BERNARDINI

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



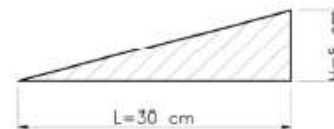
PROVE DINAMICHE

A complemento delle prove di carico statico sono state eseguite prove dinamiche con acquisizione della risposta tramite 9 accelerometri. Le prove hanno riguardato sia l'acquisizione di rumore ambientale che la misura della risposta impulsiva generata dal transito di un furgone su una corsia alla velocità di 30 km/h sopra un risalto di 8 cm opportunamente progettato.



SEZIONE TRASVERSALE RISALTO

Scala 1:5



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

DISPOSIZIONE PLANIMETRICA ACCELEROMETRI

Scala 1:100



Le caratteristiche dei sensori accelerometrici utilizzati sono:

Accelerometro modello 393A03

- Sensibilità: ($\pm 5\%$) 1000 mV/g (102 mV/(m/s²))
- Risoluzione a banda larga: 0.00001 g rms (0.0001 m/s² rms)
- Range dinamico di misura (fondo scala): ± 5 g pk (± 49 m/s² pk)
- Range di frequenza (banda passante): ($\pm 5\%$) da 0.5 a 2000 Hz
- Collegamento elettrico: 2-Pin MIL-C-5015.



PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

	PD1	PD2	PD3	PD4	PD5	PD6
freq. 1 [Hz]	2.59	2.24	2.30	2.12	2.13	2.58
freq. 2 [Hz]	6.24	5.73	6.02	5.41	5.41	6.22
freq. 3 [Hz]	8.19	7.94	8.02	8.34	7.62	8.13

Tab. 25 Evoluzione delle prime tre frequenze caratteristiche durante le varie fasi di prova

Durante le diverse fasi di carico, si è registrata una diminuzione delle frequenze proprie all'aumentare del numero dei blocchi con i quali è stata caricata la campata, dovuta all'aumento significativo della massa del sistema. Si osserva tuttavia una sostanziale coincidenza tra le frequenze misurate prima delle fasi di carico statico e quelle successive allo scarico, che evidenzia un recupero totale delle deformazioni della struttura e l'assenza di deformazioni irreversibili.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



Ordine degli Ingegneri
della provincia di Napoli

Il valore sperimentale della frequenza del primo modo flessionale, assunto come valore medio tra le prove dinamiche 1 e 6 eseguite prima dell'inizio della Prova di carico statica e alla fine della fase di scarico, risulta quindi essere pari a

$$f_1 = 2.585 \text{ Hz}$$

tale valore viene sottostimato da entrambi i modelli a causa del valore assunto per il modulo elastico del calcestruzzo. Risulta quindi utile identificare il valore del modulo elastico equivalente che consente di riprodurre il valore della prima frequenza fondamentale.

Si può arrivare a questo risultato in modo speditivo applicando le formule che forniscono le frequenze naturali di una trave elastica soggetta a vibrazioni flessionali. Appare utile considerare come momento d'inerzia il valore $I = 2.37478 \text{ m}^4$ usato sia nelle previsioni in fase di collaudo che nella stima della rigidità equivalente eseguita tramite prove statiche. Come valore di densità si è assunto 2205 kg/m^3 ottenuto come valore medio di tutte le prove eseguite sulle carote prelevate in situ.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



In questo modo si ottiene un modulo elastico equivalente di:

$$E_c^{(sper,din)} = 33.28 \text{ GN m}^2$$

e una rigidezza flessionale equivalente di:

$$EI^{(sper,din)} = 79.03 \text{ GN m}^2$$

che differisce dalla stessa stima eseguita con le prove di carico statico di circa il 3 % e fornisce quindi una conferma reciproca dell'attendibilità di entrambe le misure.

PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

Parte 2: CONSIDERAZIONI E APPLICAZIONI AL CLS E ALL'ARMATURA



GRAZIE PER L'ATTENZIONE