

INTRODUZIONE ALL'ESTENSIMETRIA

-

ALCUNI CASI DI APPLICAZIONI ESTENSIMETRICHE SU COMPONENTI INDUSTRIALI

Angelo FINELLI

ANGELO FINELLI

ESPERIENZA PROFESSIONALE

1972 – 1983	AGIP NUCLEARE S.p.A. Laboratori di Medicina (Medicina – BO)
1983 – 1988	AGIP S.p.A. Centro Ricerche Tecnologie Avanzate - Medicina (BO) Esperto Esperienze Termomeccaniche
1989 – 1993	TEMAV S.p.A. Centro Ricerche Bologna - Medicina (BO) Esperto Esperienze Termomeccaniche - Ricercatore
1994 – 2010	ENEA Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali – Faenza (RA) Ricercatore Tecnologo
1991 -	Consulenze nel campo della Meccanica Sperimentale
1997 -	3° Livello CICIPND - Esperto Misure Estensimetriche ISO 9712:2005 (Doc. 317 Rev. 2)
1994 -	Membro del Consiglio di Presidenza e Tesoriere del GRUPPO ITALIANO FRATTURA (IGF)

Analisi sperimentale delle tensioni

Risoluzione del problema strutturale (tensioni – deformazioni - spostamenti)

Metodi numerici

Metodi analitici

Metodi sperimentali (Meccanica sperimentale)

Metodi ibridi

Metodi di analisi sperimentali delle tensioni

- Fotoelasticità a trasmissione
- Fotoelasticità a riflessione
- I metodi del moirè
- Interferometria olografica
- I metodi speckle
- I metodi basati sull'effetto termoelettrico
- Altri metodi (vernici fragili, diffrazione a raggi x, metodo del reticolo, caustiche, sensori a fibra ottica, acustoelasticità, ecc.)
- **Estensimetria mediante estensimetri elettrici a resistenza**

Introduzione all'estensimetria

- Meccanica del continuo
- Proprietà meccaniche dei materiali
- Estensimetri elettrici a resistenza

Meccanica del Continuo

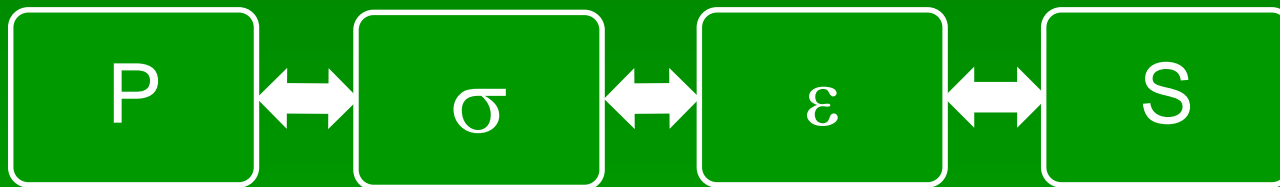
Studio dell'equilibrio elastico di un corpo continuo

Definizione del continuo

- Si definisce continuo un corpo il cui volume è occupato da materia in ogni sua parte.
- Vogliamo studiare la trasformazione che un corpo continuo subisce quando è sottoposto ad un insieme di forze e distorsioni.
- Questa trasformazione porta alla variazione dell'assetto geometrico del corpo e alla comparsa di stati tensionali.

Diagramma di flusso

- Tale trasformazione può essere rappresentata dal seguente diagramma di flusso



- P • Insieme delle forze interne e superficiali che agiscono sul corpo,
- σ • Insieme delle tensioni che si sono destate in ogni punto del corpo,
- ϵ • Insieme delle deformazioni che si misurano all'interno del corpo,
- S • Insieme degli spostamenti di ogni punto del corpo.

I tre legami

$$P \longleftrightarrow \sigma$$

- Questo legame è fornito da condizioni di equilibrio,

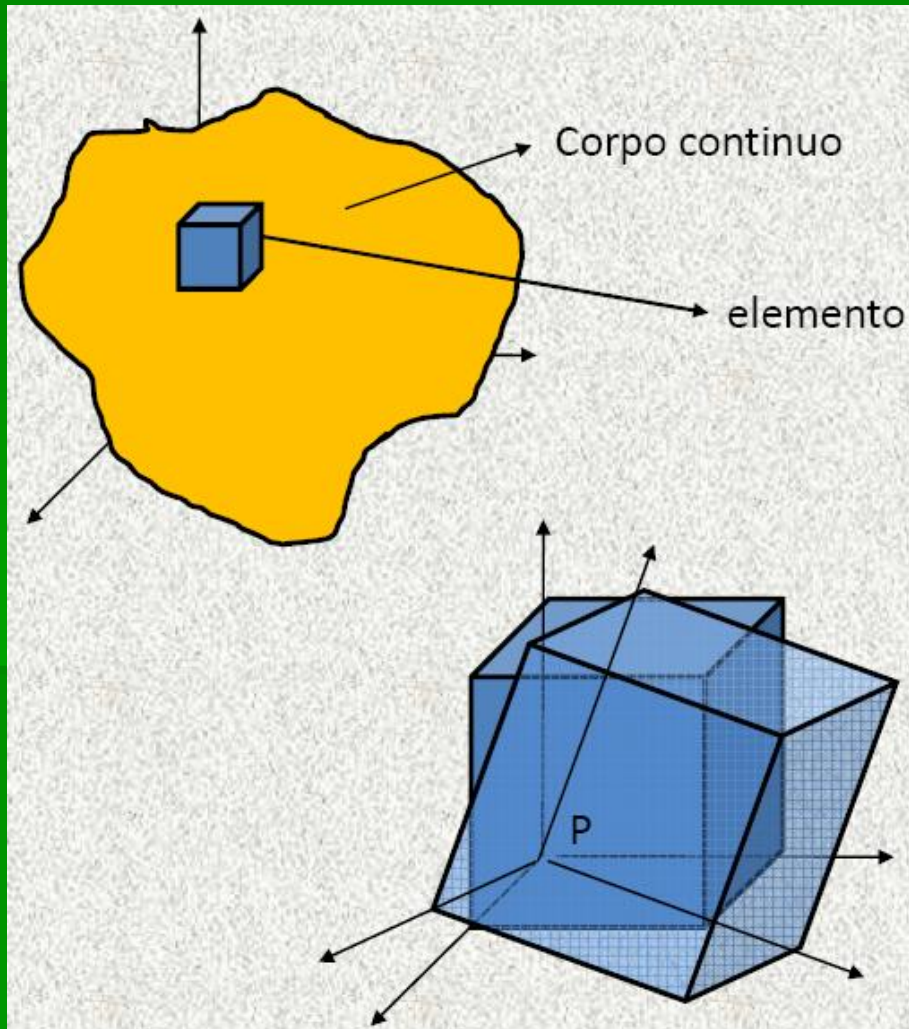
$$\sigma \longleftrightarrow \varepsilon$$

- Questo legame è fornito da leggi costitutive del materiale,

$$\varepsilon \longleftrightarrow S$$

- Questo legame è fornito da condizioni di congruenza.

La deformazione del continuo



Allungamenti:

$$\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z$$

Scorrimenti:

$$\gamma_{xy}; \quad \gamma_{yz}; \quad \gamma_{zx}$$

Il legame $\sigma - \varepsilon$: Relazioni di Navier

(Equazioni di elasticità)

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

E - Modulo di elasticità normale o modulo di Young,

ν - Modulo di Poisson,

$G = E/2 (1 + \nu)$ - Modulo di elasticità tangenziale.

Il legame $\sigma - \varepsilon$: Relazioni inverse di Navier

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \left[\varepsilon_x - \nu \cdot (\varepsilon_y + \varepsilon_z - \varepsilon_x) \right]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \left[\varepsilon_y - \nu \cdot (\varepsilon_z + \varepsilon_x - \varepsilon_y) \right]$$

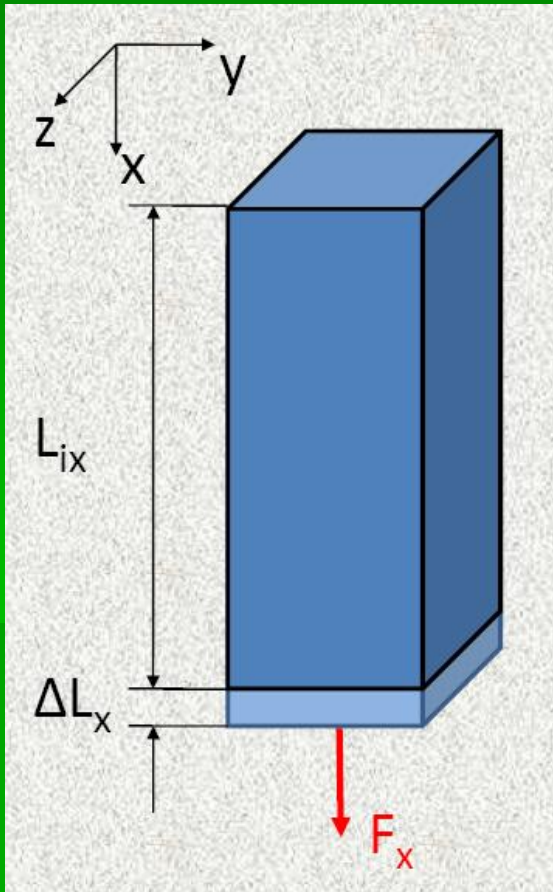
$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \left[\varepsilon_z - \nu \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_z) \right]$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}; \quad \tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}; \quad \tau_{zx} = G \cdot \gamma_{zx}$$

Proprieta meccaniche dei materiali

Concetto di deformazione, di tensione, modulo di Young, modulo di Poisson.

Concetto di deformazione



$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{ix}}$$

L_{ix} = Lunghezza iniziale del provino [mm]

ΔL_x = variazione di lunghezza [mm] = $L_{fx} - L_{ix}$

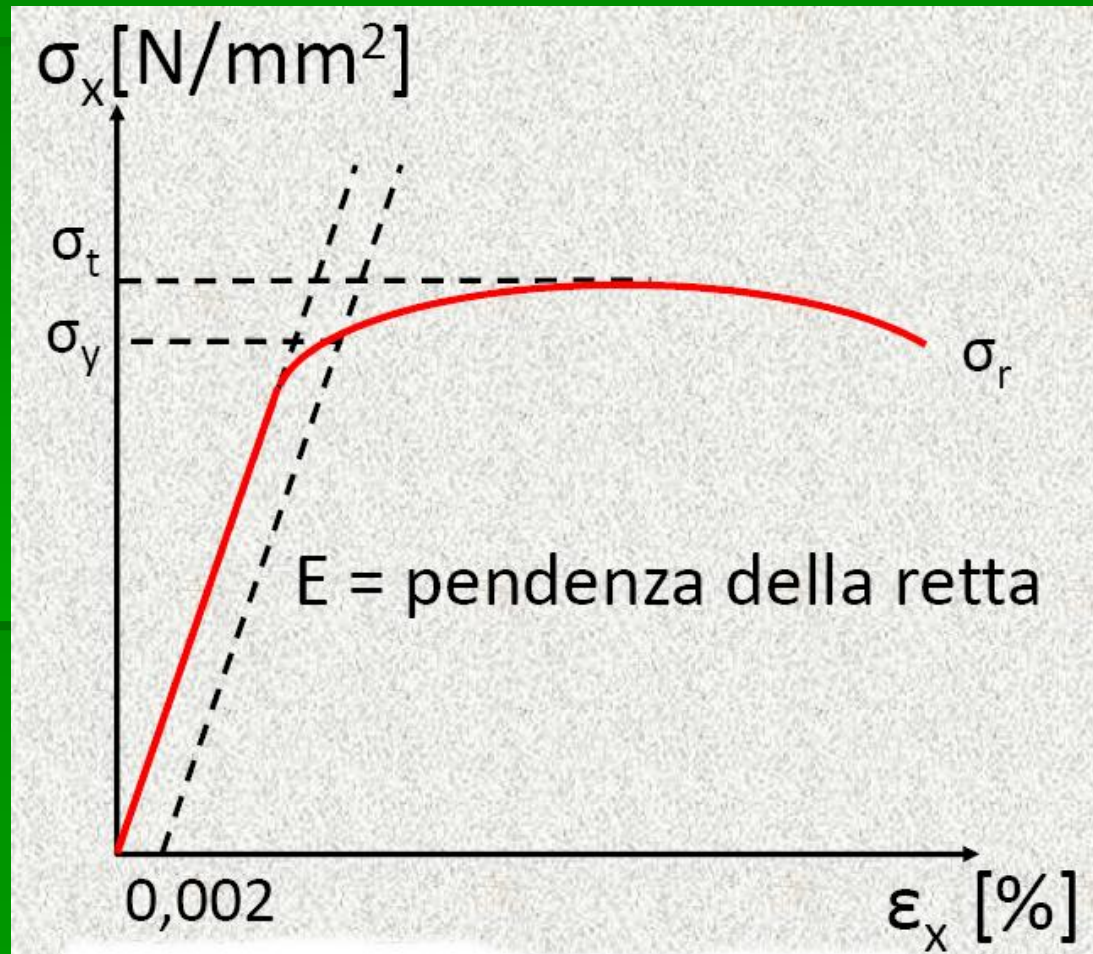
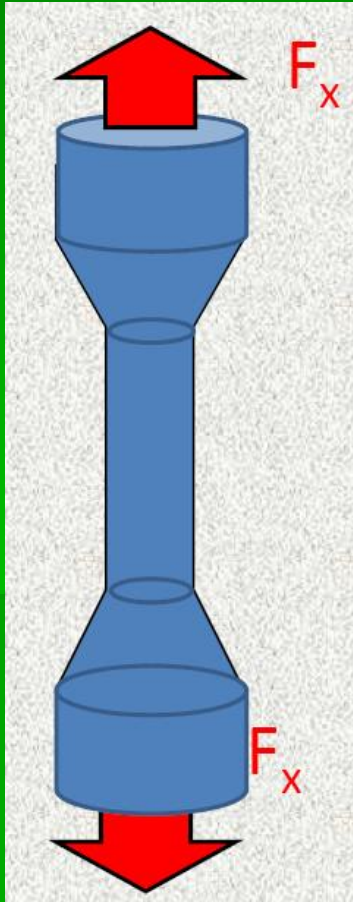
ε_x = deformazione lungo x

Legge di Hooke

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$$

E = modulo di Young o modulo di elasticità normale [N/mm²]

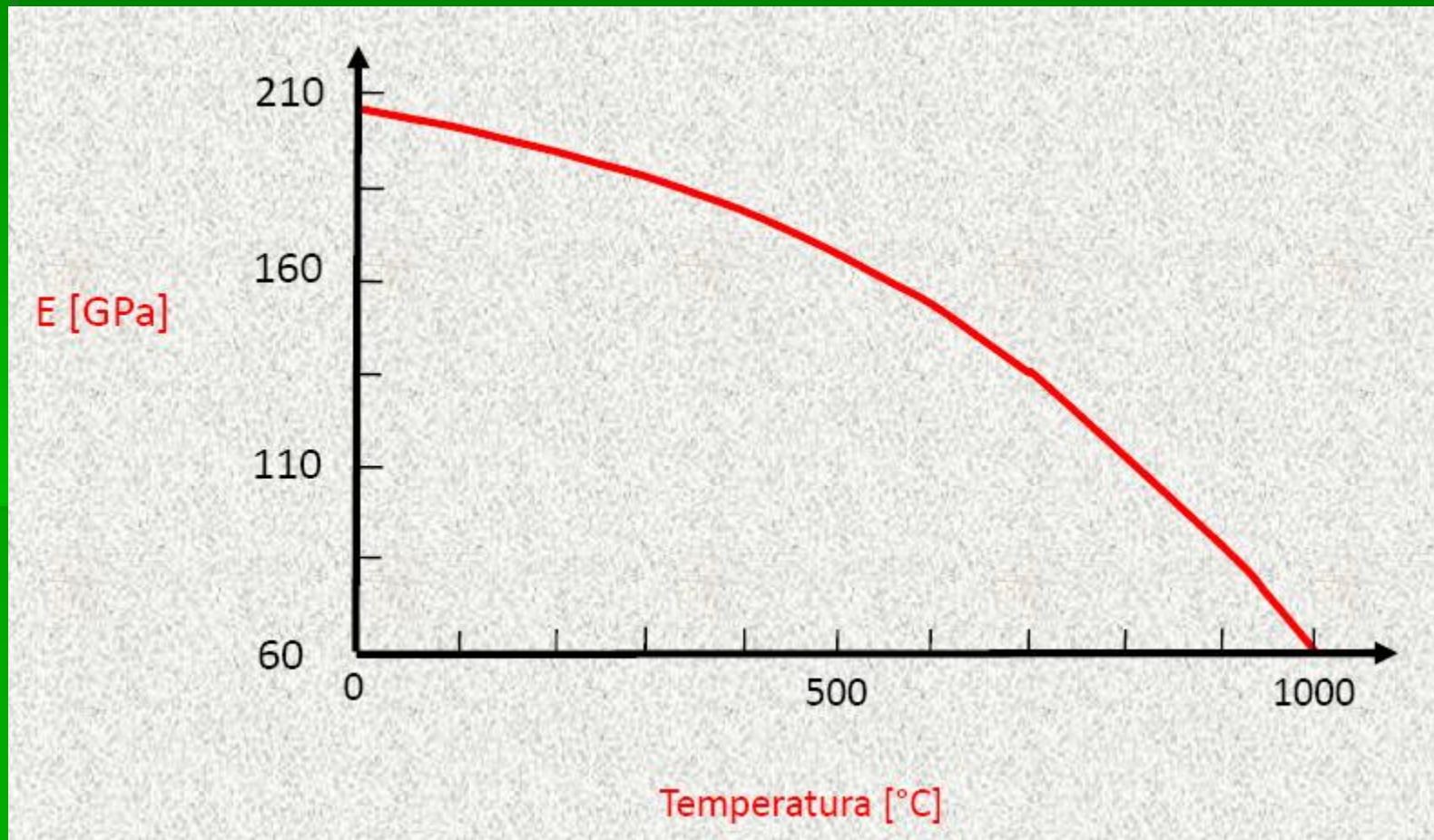
Misura sperimentale di E



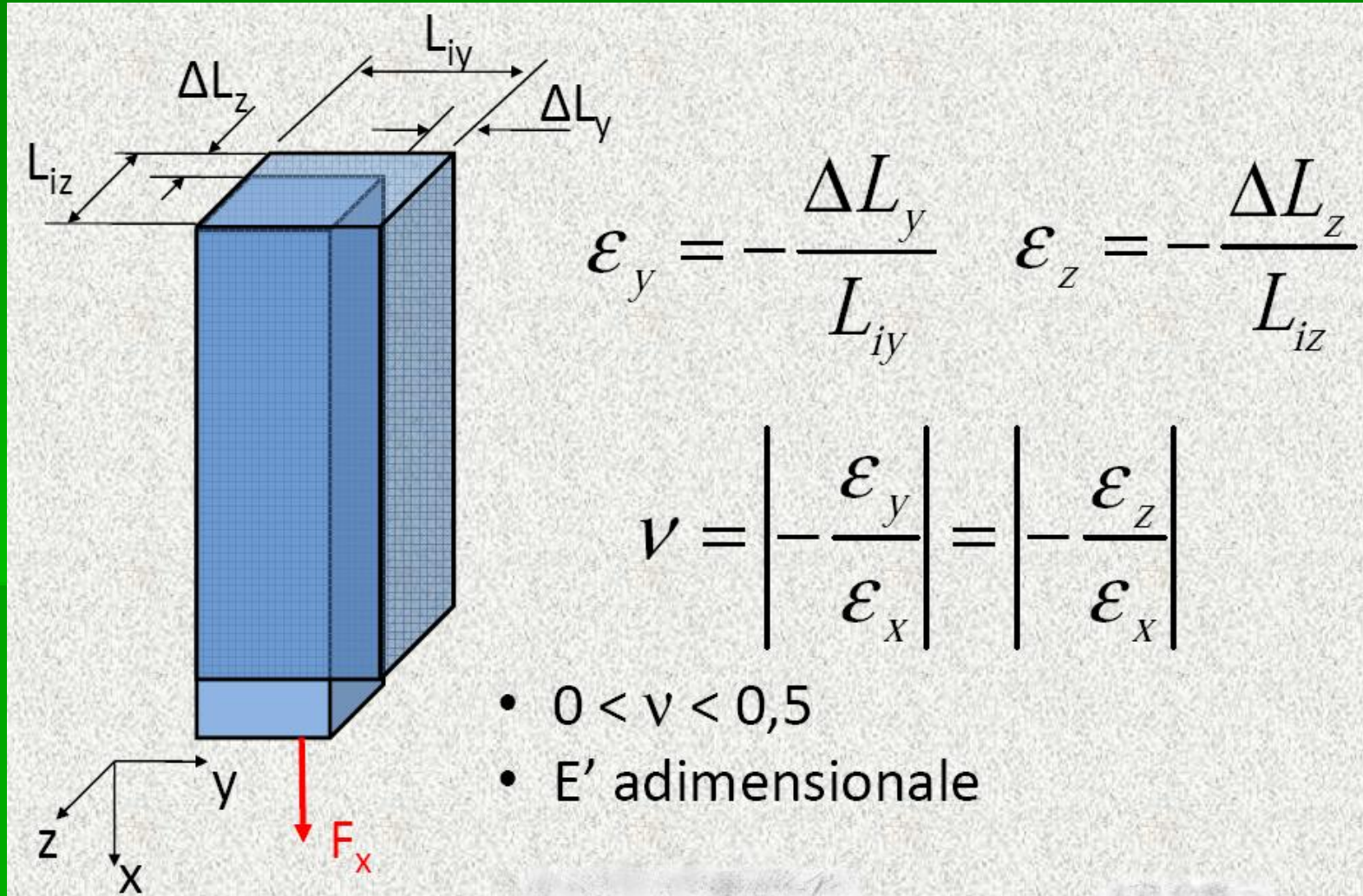
Modulo di Young

- Dipende dal tipo di materiale
- Diminuisce all'aumentare della temperatura (così come diminuiscono la tensione di snervamento σ_y e la tensione di rottura σ_r)

Andamento di E vs Temperatura per l'acciaio



Modulo di Poisson



Valori tipici di E e ν

Materiale	Modulo di Young [N/mm ²]	Modulo di Poisson
Ferro	193000	0,17
Piombo	14000	0,45
Acciaio 4340	207000	0,29
Acciaio INOX AISI 304	196000	0,25
Alluminio 2024-T4	73000	0,32
Rame	123000	0,33
Vetro	70000	0,21
Legno	Da 7000 a 14000	-
Cemento	Da 20000 a 40000	Da 0,1 a 0,3
Gomma	Variabile	0,5

Estensimetri elettrici a resistenza

Cosa misuriamo, come funziona l'estensimetro, il ponte di Wheatstone, configurazione del ponte, influenza della temperatura

Ma cosa misuriamo sperimentalmente?

- L'unica grandezza che è possibile misurare è la deformazione.
- Misurata la deformazione è possibile ricavare tutte le altre grandezze (tensioni meccaniche, modulo di Young, modulo di Poisson,...)
- La misura delle deformazioni può essere effettuata con l'aiuto dell'estensimetria

Che cos'è l'estensimetria?

È un metodo per l'analisi sperimentale delle deformazioni.

Definizione di estensimetro

L'estensimetro è un dispositivo in grado di misurare la deformazione, nella direzione assegnata, dell'oggetto su cui è posizionato.

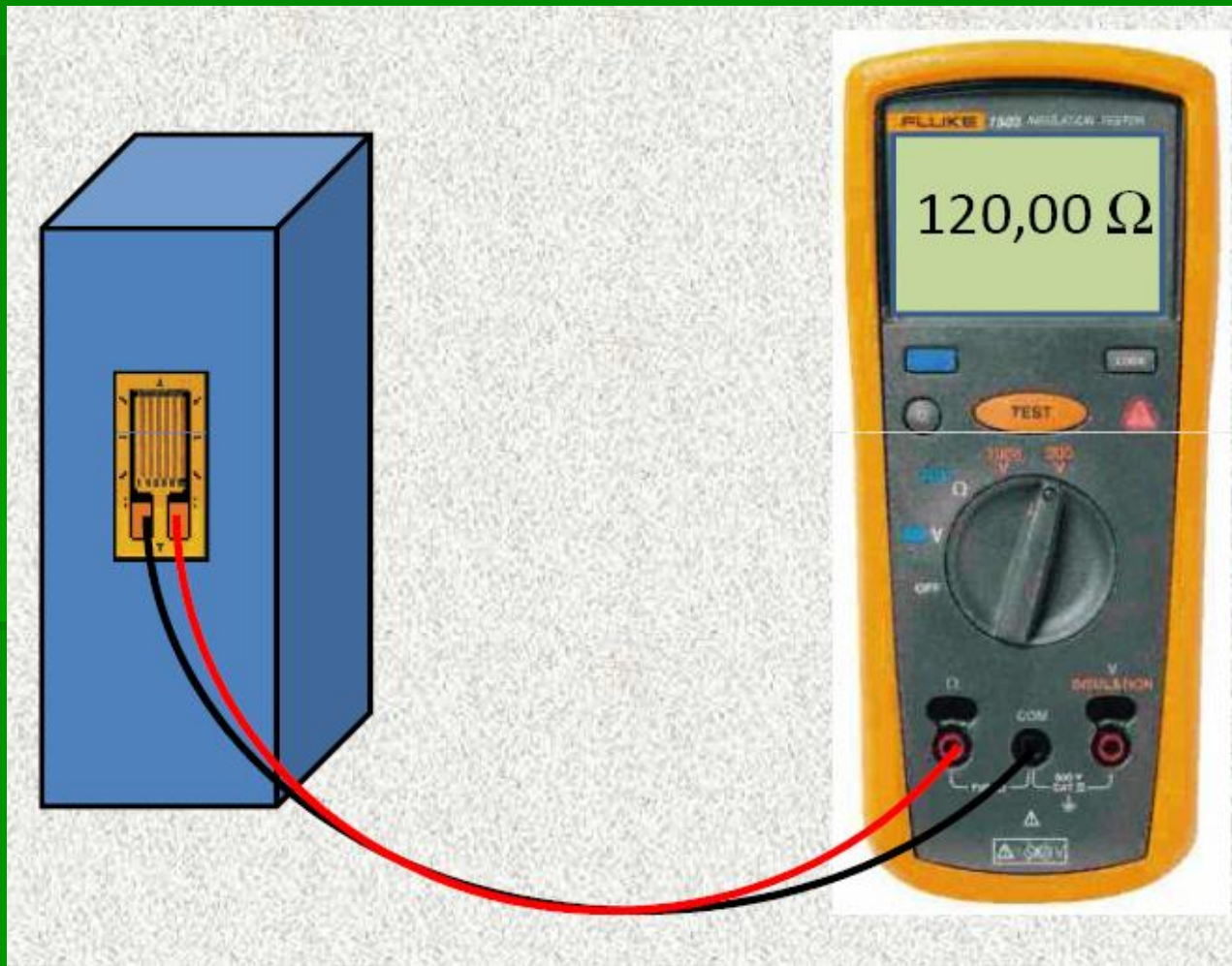
Estensimetro elettrico a resistenza

E' costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico. Venne inventato da Edward E. Simmons e Arthur C. Ruge nel 1938.

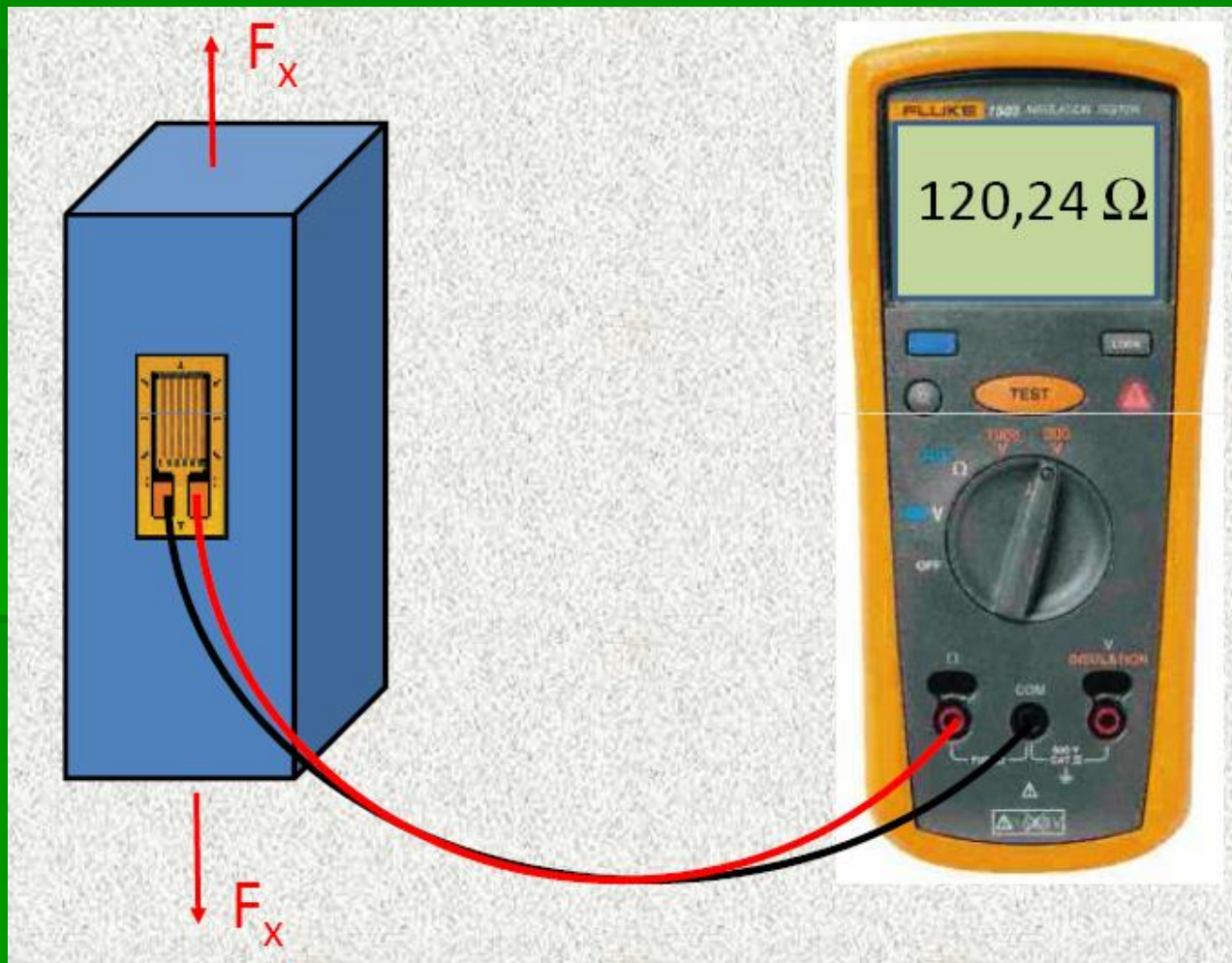
L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni. Il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa; queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un ponte di Wheatstone tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate.

Le dimensioni di un estensimetro possono variare da pochi micron ad alcuni centimetri. Quelli di dimensioni minori sono utilizzati per misure puntuali, cioè per conoscere il valore delle deformazioni in un punto preciso, mentre quelli di maggior lunghezza sono utili per rilevare la deformazione media relativa ad un'area più estesa.

Ma come funziona?



Ma come funziona?



Deformazione vs variazione di resistenza

- Cioè alla deformazione del provino prodotta dalla forza F si associa una variazione della resistenza elettrica dell'estensimetro incollato sul provino stesso.
- Qual è la relazione che lega deformazione e variazione di resistenza?

Seconda legge di OHM

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R = Resistenza del conduttore [Ω]

ρ = Resistività [Ωm]

L = Lunghezza del conduttore [m]

S = Sezione del conduttore [m^2]

Legge fondamentale dell'estensimetria

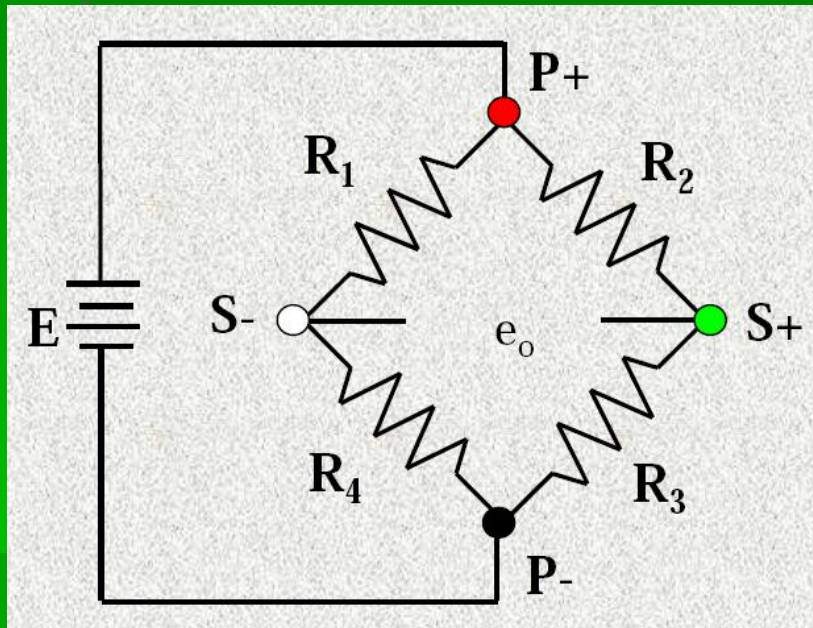
$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R_g}$$

- ε = deformazione [$\mu\varepsilon$]
- k = gage factor
- R_g = Resistenza iniziale dell'estensimetro [Ω]
- ΔR = Variazione di Resistenza dell'estensimetro [Ω] = $R_f - R_g$
- R_f = Resistenza finale dell'estensimetro [Ω]

Misura di una resistenza elettrica

- Per misurare la deformazione dobbiamo eseguire una misura di resistenza elettrica,
- Per misurare in modo preciso il valore di una resistenza elettrica si usa il Ponte di Wheatstone che fu inventato da Samuel Hunter Christie e perfezionato da Charles Wheatstone.

Il ponte di Wheatstone



- E = tensione di alimentazione del ponte,
- e_o = tensione di uscita,
- R_1, R_2, R_3 e R_4 = resistenze,
- $P+ P- =$ diagonale di alimentazione (P = Power)
- $S+ S- =$ diagonale di uscita (S = Signal)
- $P+S-, S-P-, P-S+$ e $S+P+ =$ rami del ponte. (Per definizione rami adiacenti hanno segno opposto, rami opposti segni uguali).

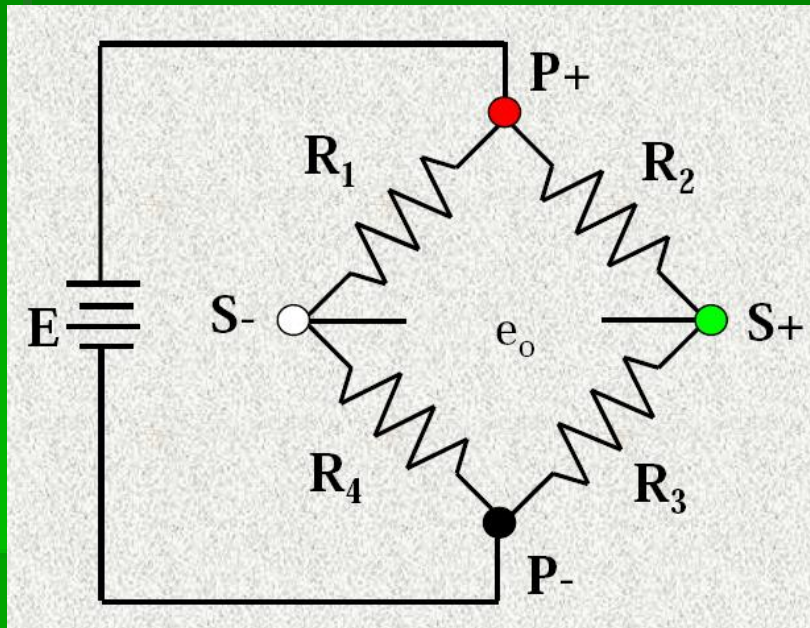
Il ponte di Wheatstone

Il ponte di Wheatstone è un circuito elettrico in grado di rilevare piccole variazioni di resistenza. Per questa sua proprietà, viene utilizzato per misurare la variazione di resistenza degli estensimetri. Il ponte, come visto nella slide precedente, è costituito dal collegamento di quattro resistori. Supponiamo che:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4, \text{ oppure} \\ R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4$$

Quando una qualunque tensione viene applicata fra P+ e P-, il segnale di uscita fra S+ e S- è pari a zero. In questo stato il ponte viene definito bilanciato. Quando viene meno questa condizione, la tensione di uscita è direttamente proporzionale alla variazione di resistenza.

Il ponte di Wheatstone



$$e_o = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

$$\frac{e_o}{E} = \varepsilon K$$

Unità di misura della deformazione

- La deformazione è una grandezza adimensionale (rapporto tra una variazione di lunghezza su lunghezza iniziale)

$$\frac{\mu m}{m}$$

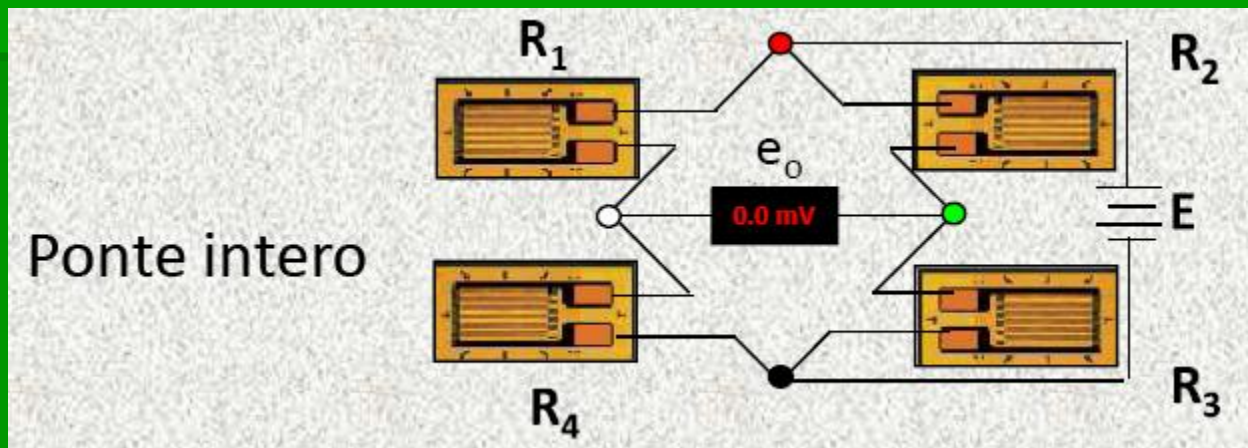
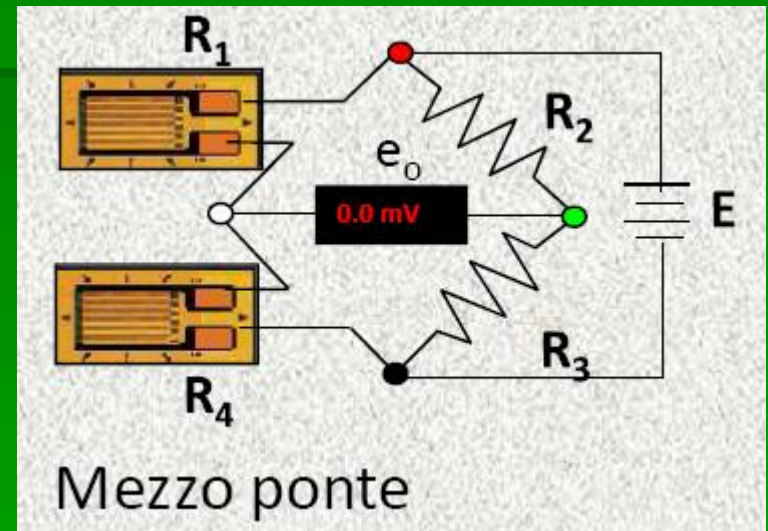
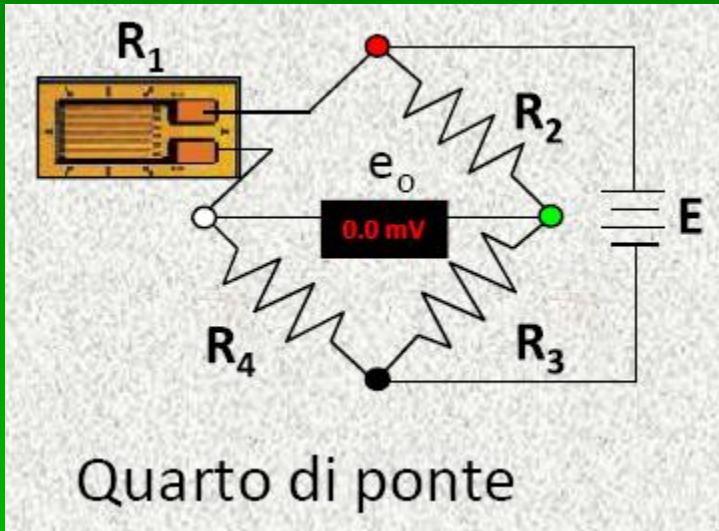
- E' uso comune esprimerla come (Non è una unità di misura del S.I.)

$$\mu\varepsilon$$

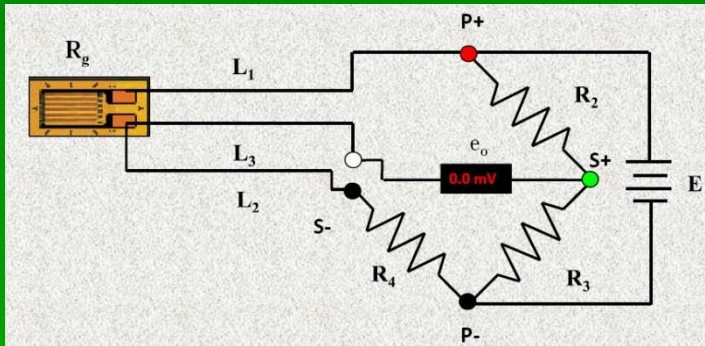
- Ulteriore modo di esprimerla %

$$\%$$

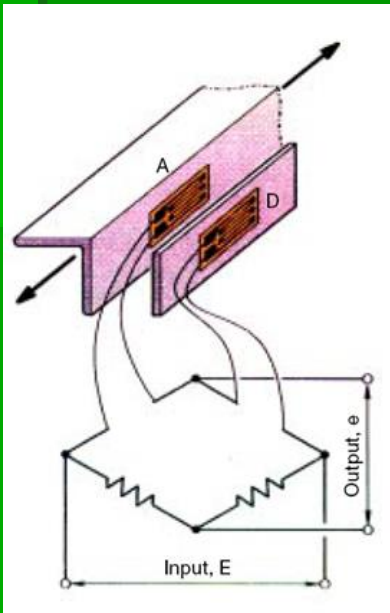
Configurazioni del ponte



Collegamento a quarto di ponte

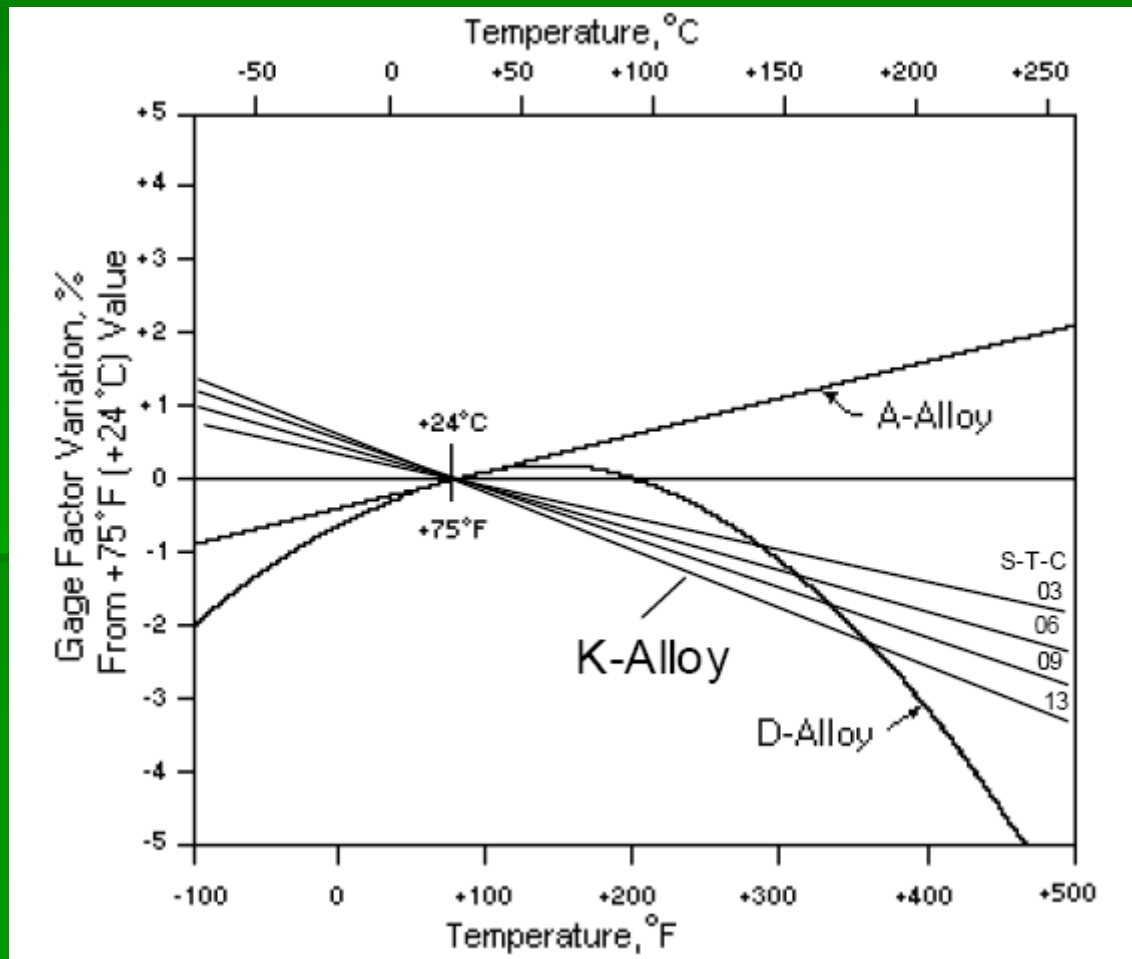


Collegamento a tre fili: Non consentito da tutti gli strumenti di misura. Compensa le variazioni termiche e di resistenza dovute alla lunghezza dei cavi ma non compensa le variazioni di temperatura del campione

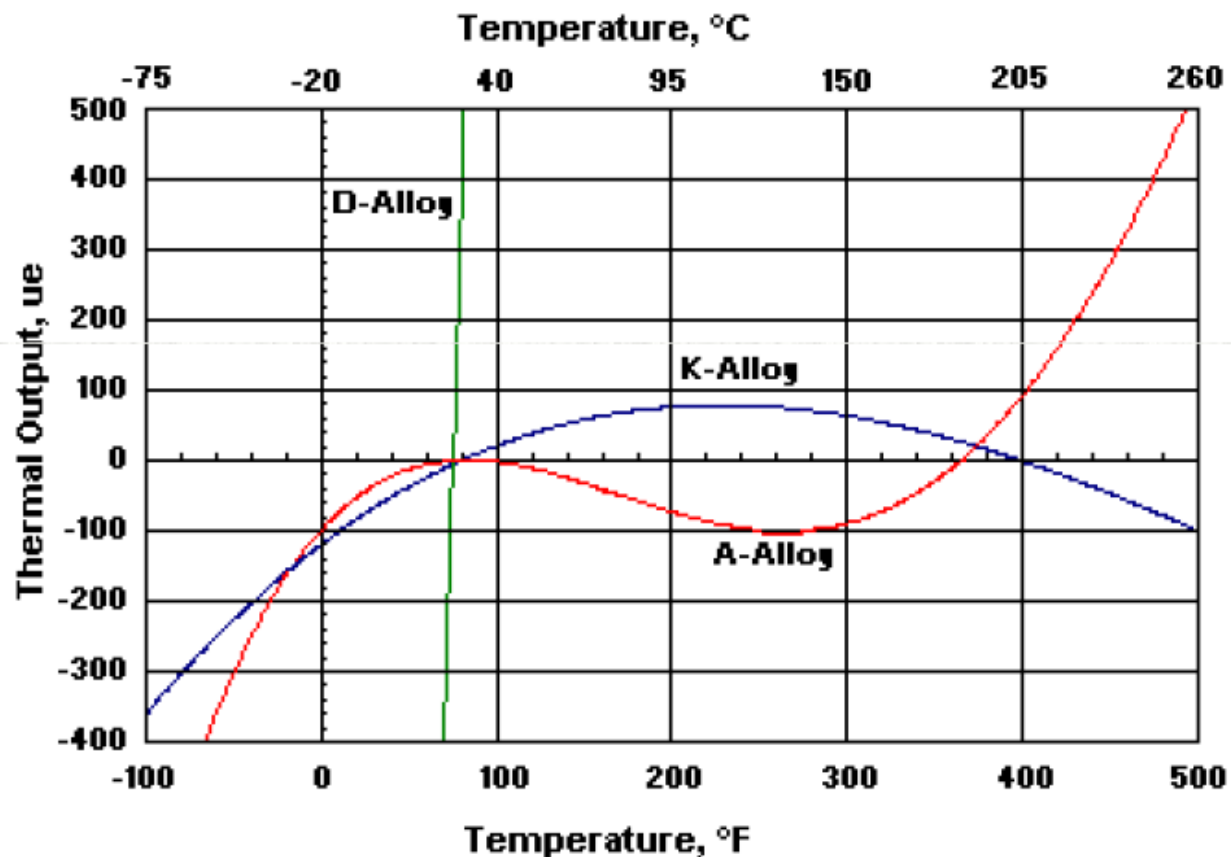


Il collegamento prevede l'utilizzo di un solo estensimetro attivo ma collegato a mezzo ponte con un estensimetro "dummy". Vengono compensate le variazioni termiche e di resistenza dovute alla lunghezza dei cavi e le variazioni di temperatura del campione

Variazione del gage factor con la temperatura



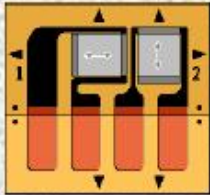
Deformazione apparente vs temperatura



Non sempre usiamo l'estensimetro singolo

- Si può usare quando è noto lo stato di deformazione della struttura (si conoscono le direzioni principali di deformazione):
 - Trave soggetta a sforzo normale, a flessione pura, a torsione.
- Su strutture complesse, non conoscendo a priori lo stato di deformazione (non sono note le direzioni principali), usiamo le rosette.

Tipi di rosette estensimetriche



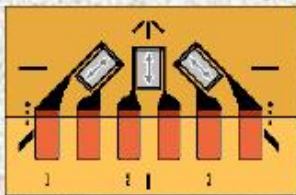
T

2 griglie a 90°



Chevron

2 griglie a 90° rispetto
all'asse centrale



Rettangolari

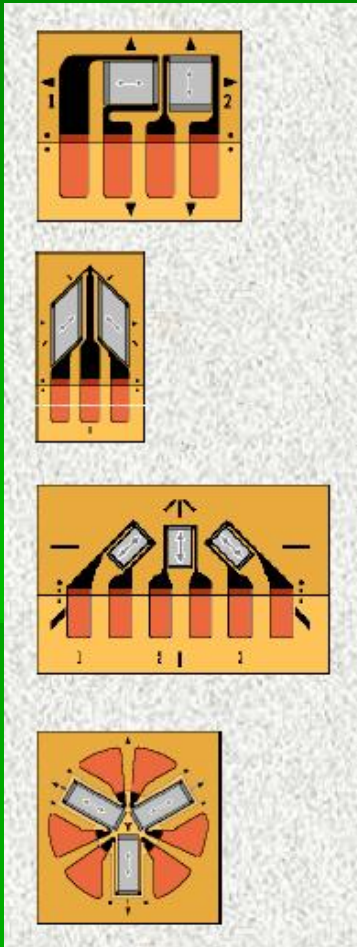
3 griglie a 45°



Delta

3 griglie a 60°

Quando usarle?

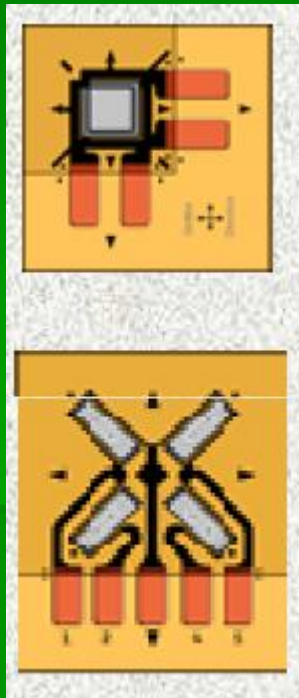


Le **rosette T**: quando sono note le direzioni principali di deformazione,

Le **Chevron**: per misurare il taglio o la torsione,

Le **Rettangolari** o le **Delta**: quando non sono note le direzioni principali di deformazione. Storicamente quelle più usate sono le rosette rettangolari perché sono caratterizzate da formule più semplici.

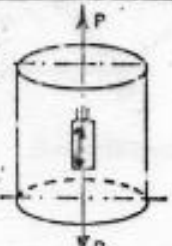
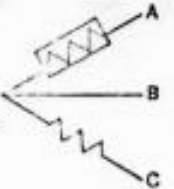
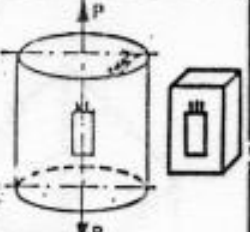
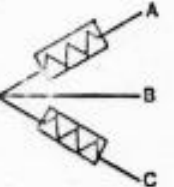
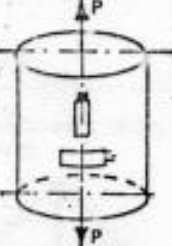
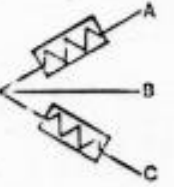

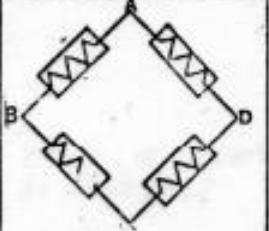
Altre rosette



Le griglie affiancate dissipano meglio il calore, quelle sovrapposte occupano meno spazio.

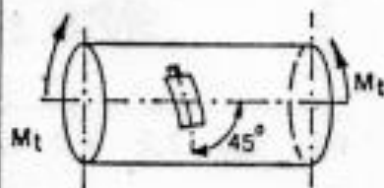
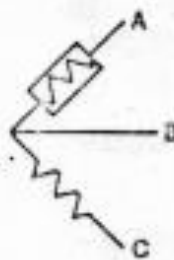
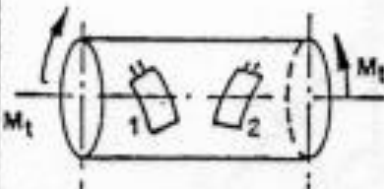
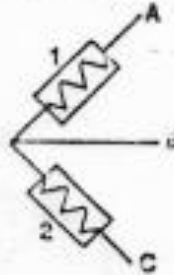
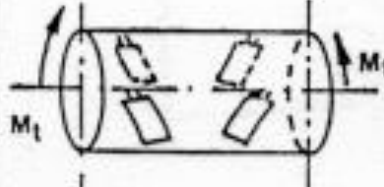
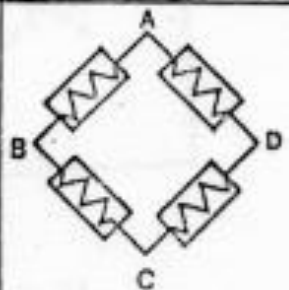
Esistono anche rosette a 4 griglie che permettono una misura ridondante.

Schemi di collegamento

DISTOSIZIONE e.s.r.	CIRCUITO DI MISURA	SEGNALE DI MISURA
		$\epsilon_a \pm \epsilon_t \pm \epsilon_{\Delta t}$
		$\epsilon_a \pm \epsilon_t$
		$\epsilon_a + \epsilon_t \pm \epsilon_t =$ $= \epsilon_a (1 + \nu) \pm \epsilon_t$
		$2\epsilon_a + 2\epsilon_t =$ $= 2\epsilon_a (1 + \nu)$

Trazione
e
Compressione

Schemi di collegamento

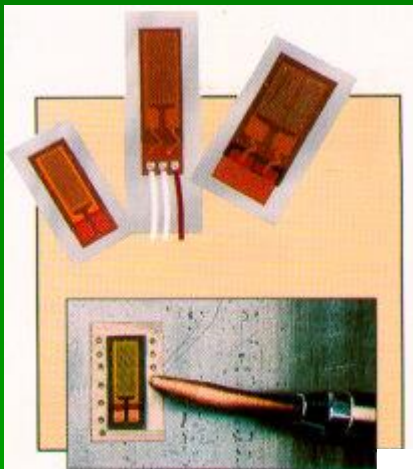
DISPOSIZIONE e.e.r.	CIRCUITO DI MISURA	SEGNALE DI MISURA
		$\epsilon_T \pm \epsilon_l \pm \epsilon_{\Delta l} \pm \epsilon_{\Delta t}$
		$2\epsilon_T \pm (\epsilon_{l1} - \epsilon_{l2})$
		$4\epsilon_T$

Torsione
e
Taglio

Alcuni casi di applicazioni estensimetriche su componenti industriali

Storie di vita vissuta

Estensimetri, quali ?





**Estensimetri,
cosa ?**

Celle di carico



Torsiometri



Accelerometri

Estensimetri, cosa ?



Trasduttori di
spostamento



Trasduttori
di pressione



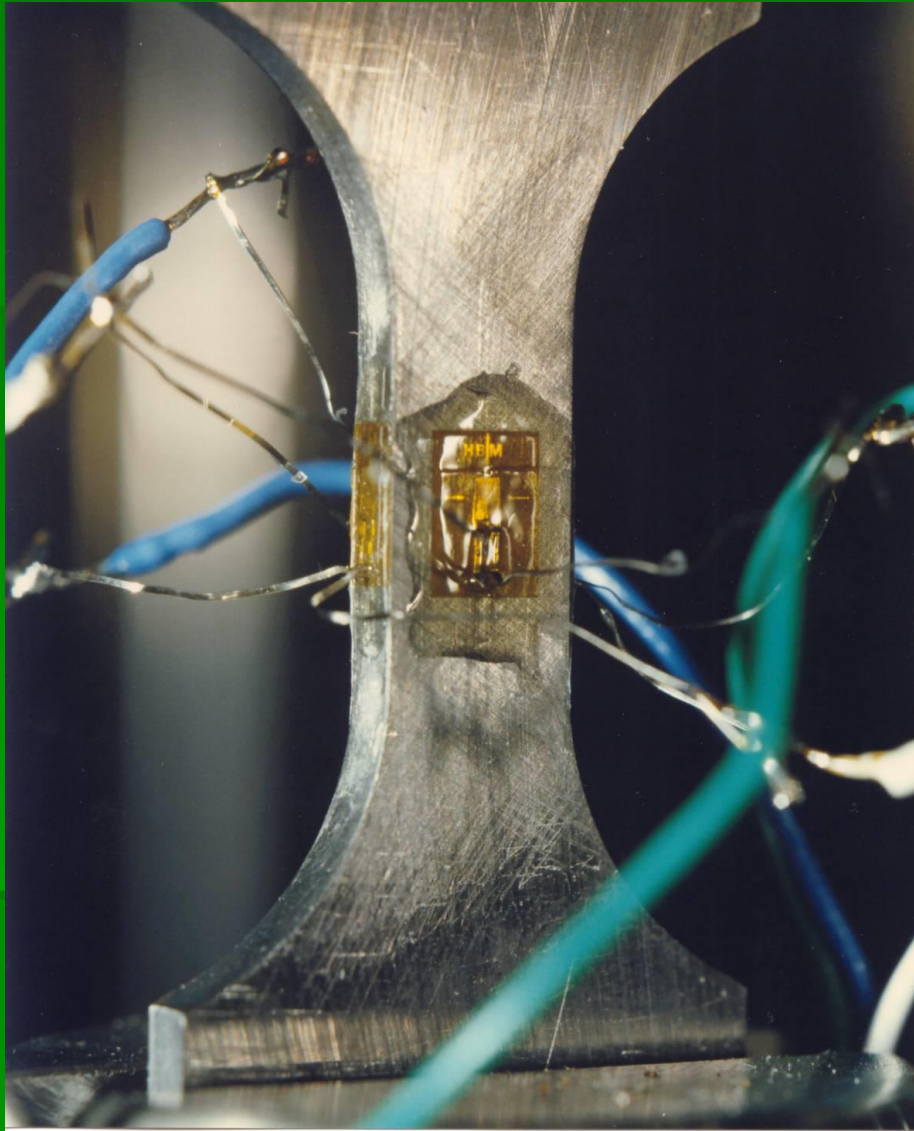
Estensometri



Sensori speciali

Estensimetri, dove ?

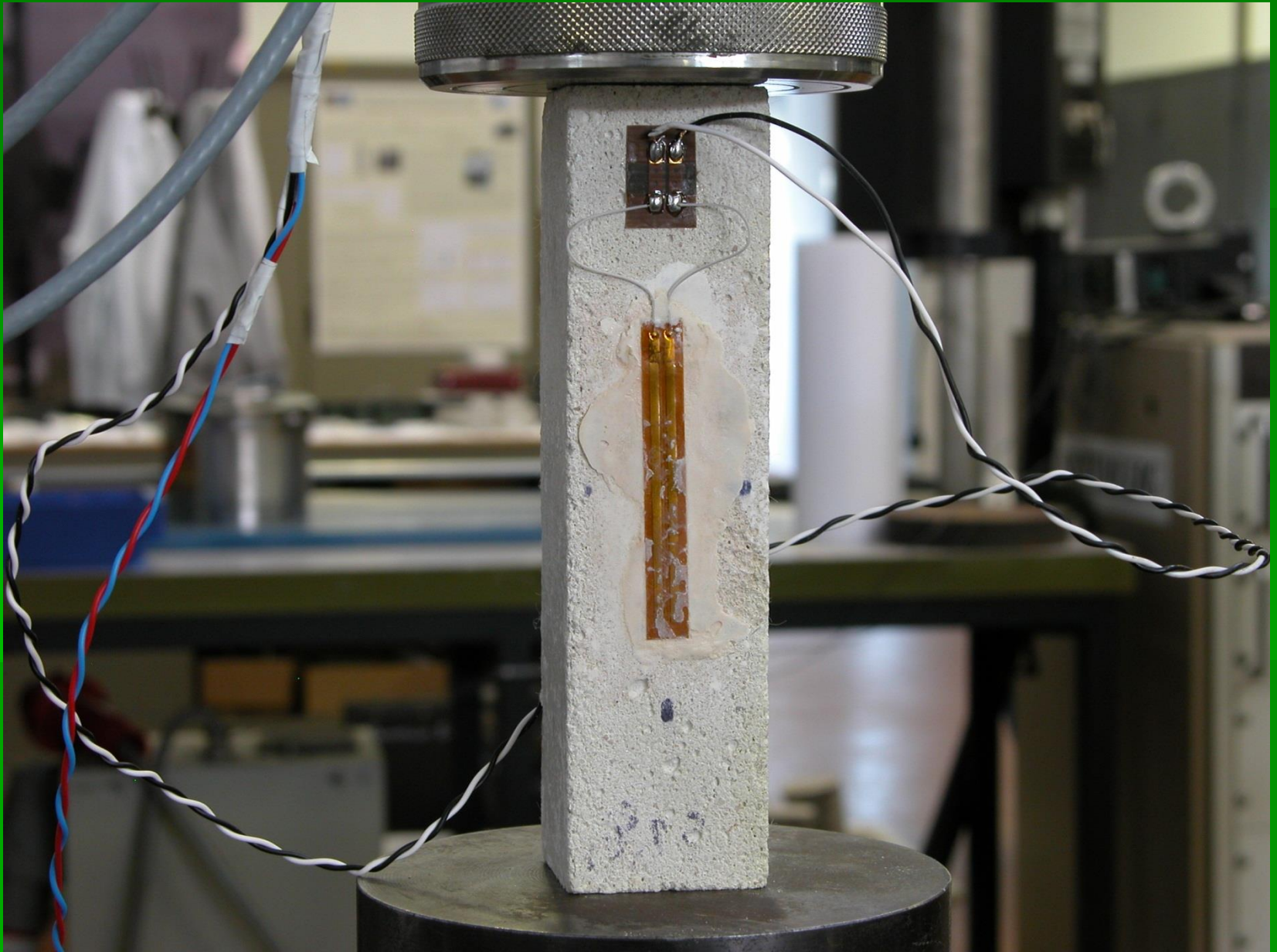


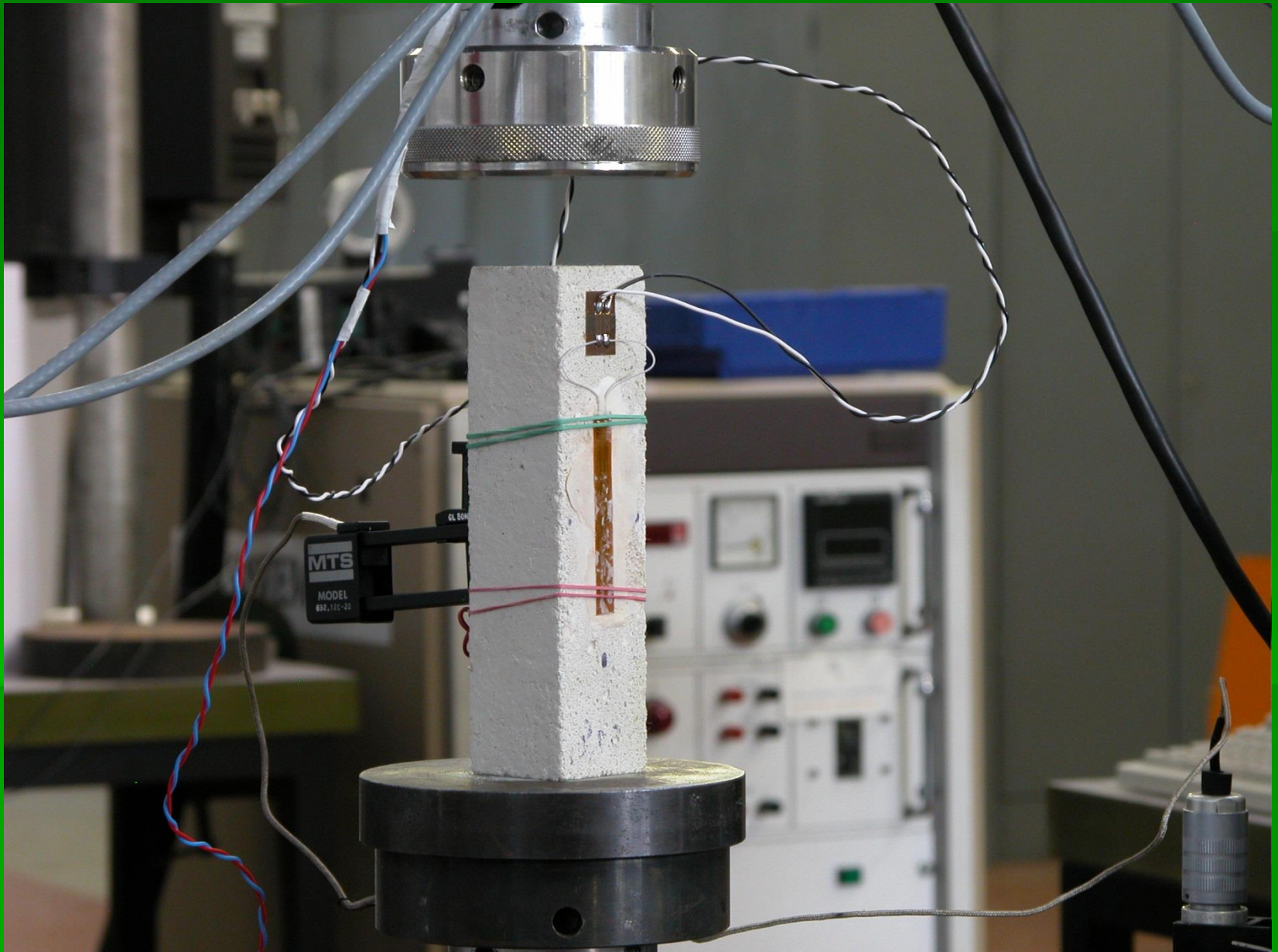


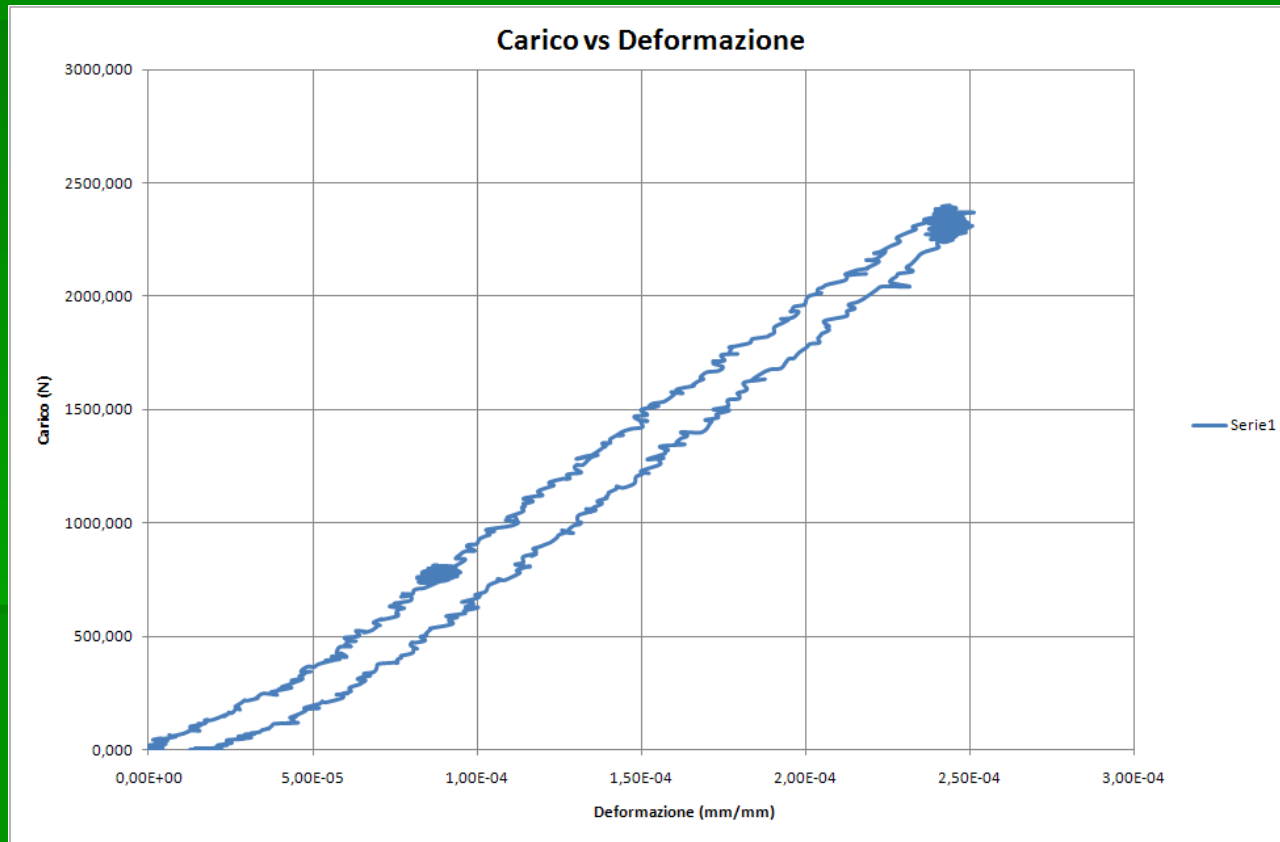
Estensimetri in laboratorio

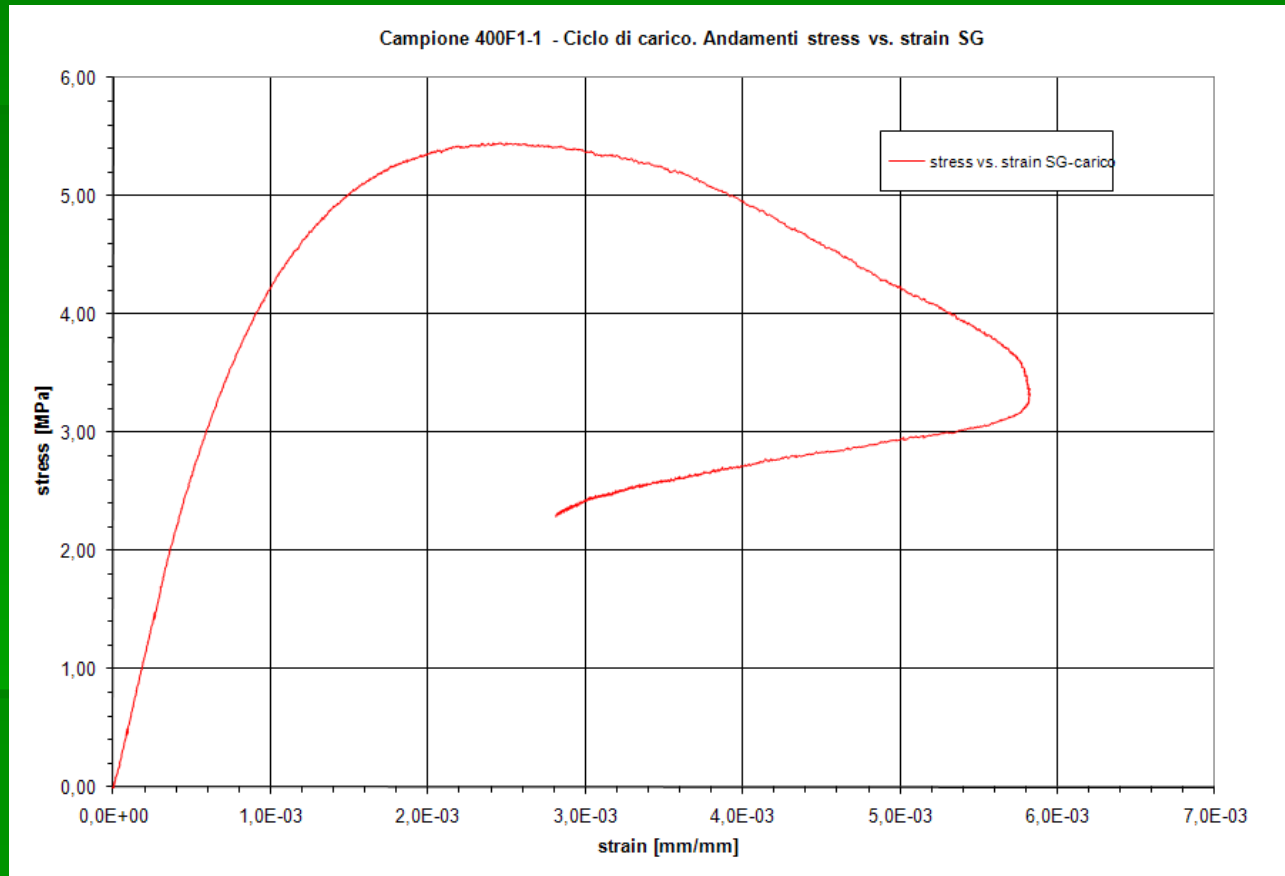
A. Finelli; M. Labanti – Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels - Fatica ed integrità strutturale, Luglio 2010

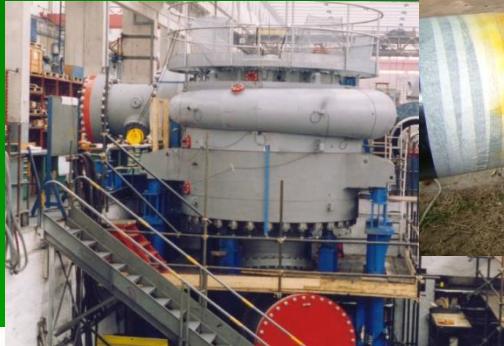
<http://www.gruppofrattura.it/ors/index.php/fis/article/view/90/78>



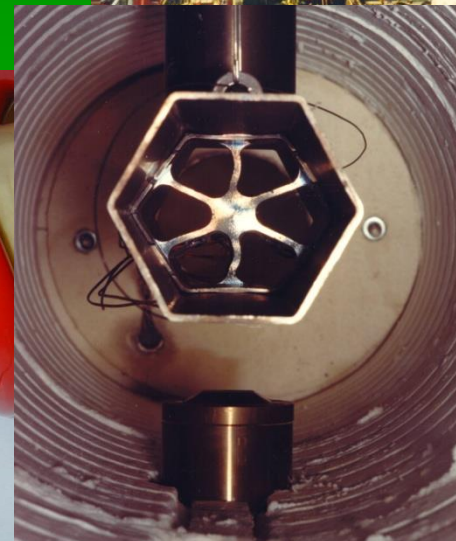
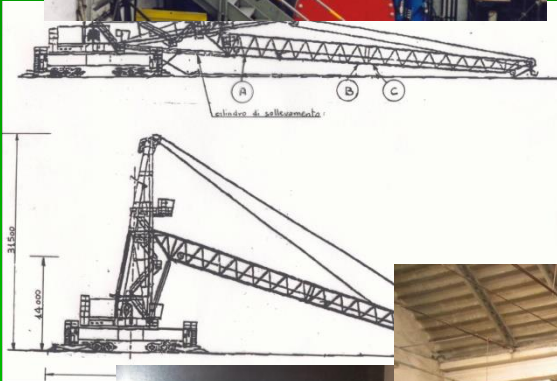








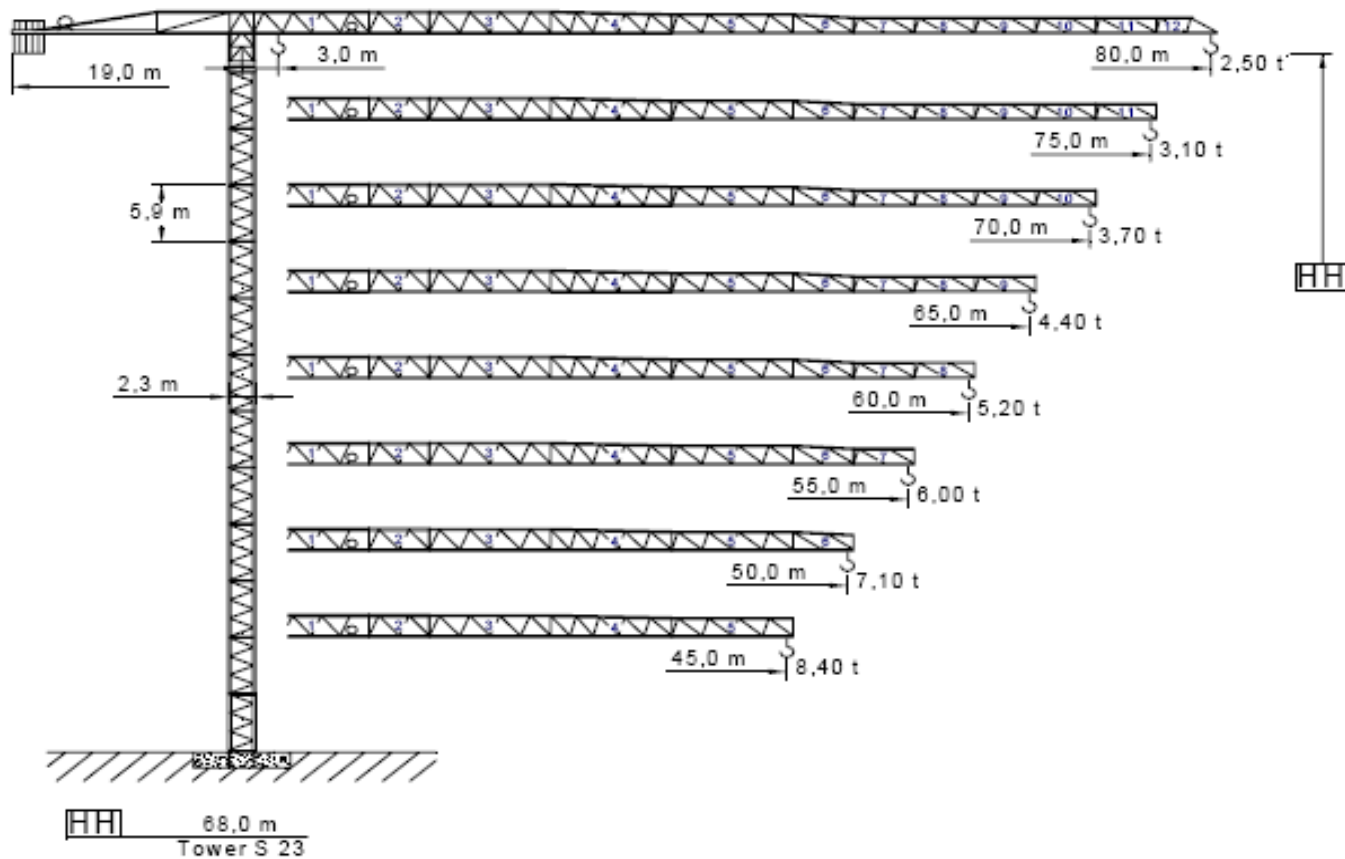
Estensimetri a supporto dell'attività industriale



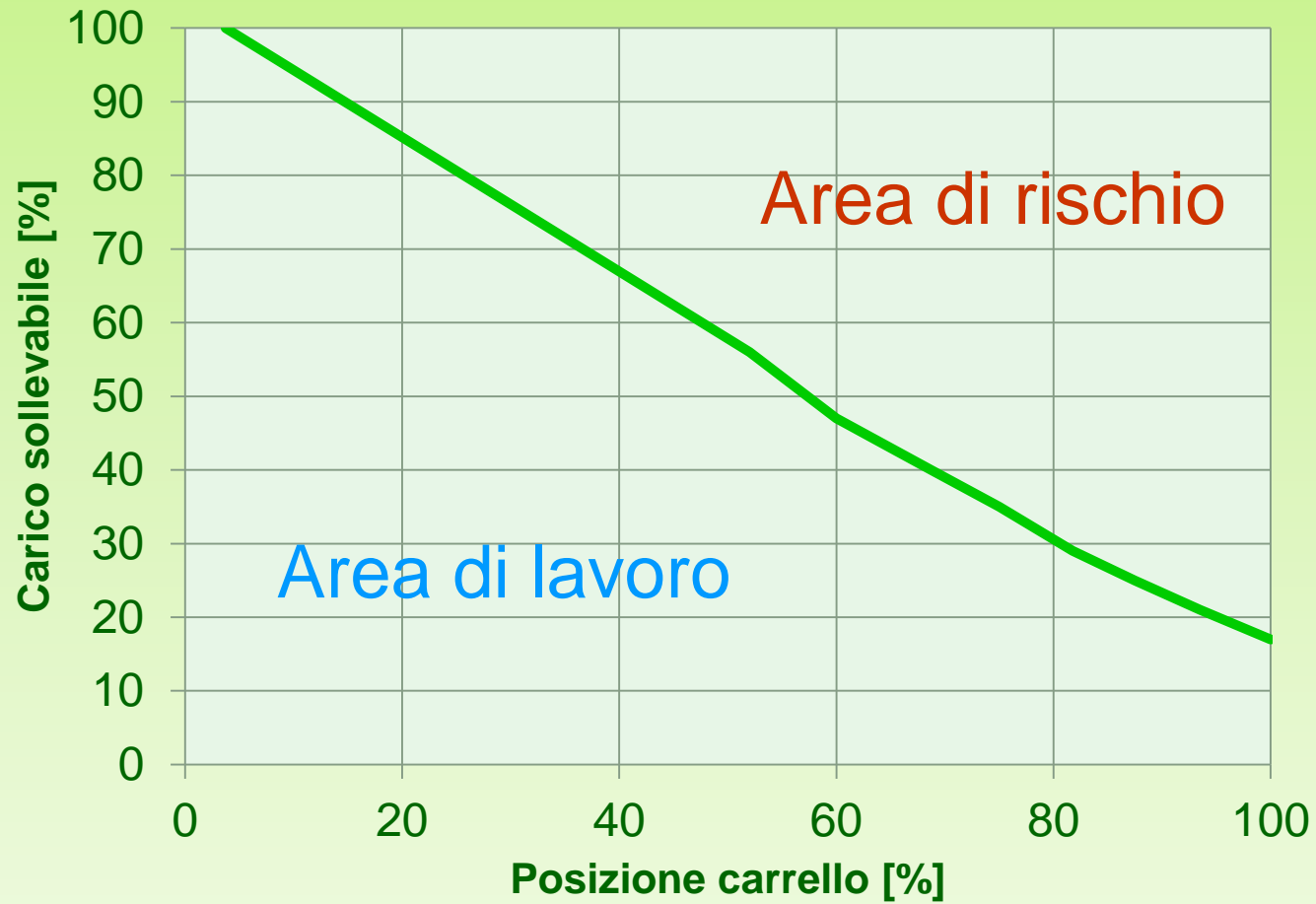
La gru edile



Capacità di sollevamento



Curva di sicurezza





Lifting facilities main crane:

2 twin S 7000

Main blocks tandem lift: 14,000 t

Main block single lift: 7,000 t at 40 m rad./41 m

Lowering capability to 450 m below sea level

SAIPEM 7000

Dimensions:

Length: 198 m

Breadth: 87 m

Depth to main deck: 45 m

Transit draft: 10.5 m

Operational draft: 27.5 m

Carichi sempre maggiori



..... Scarse condizioni di visibilità



..... il lavoro notturno



..... bracci sempre più lunghi



..... i riferimenti



.. i riferimenti ?????...



..... le conseguenze ... ieri !!!!!!!!!

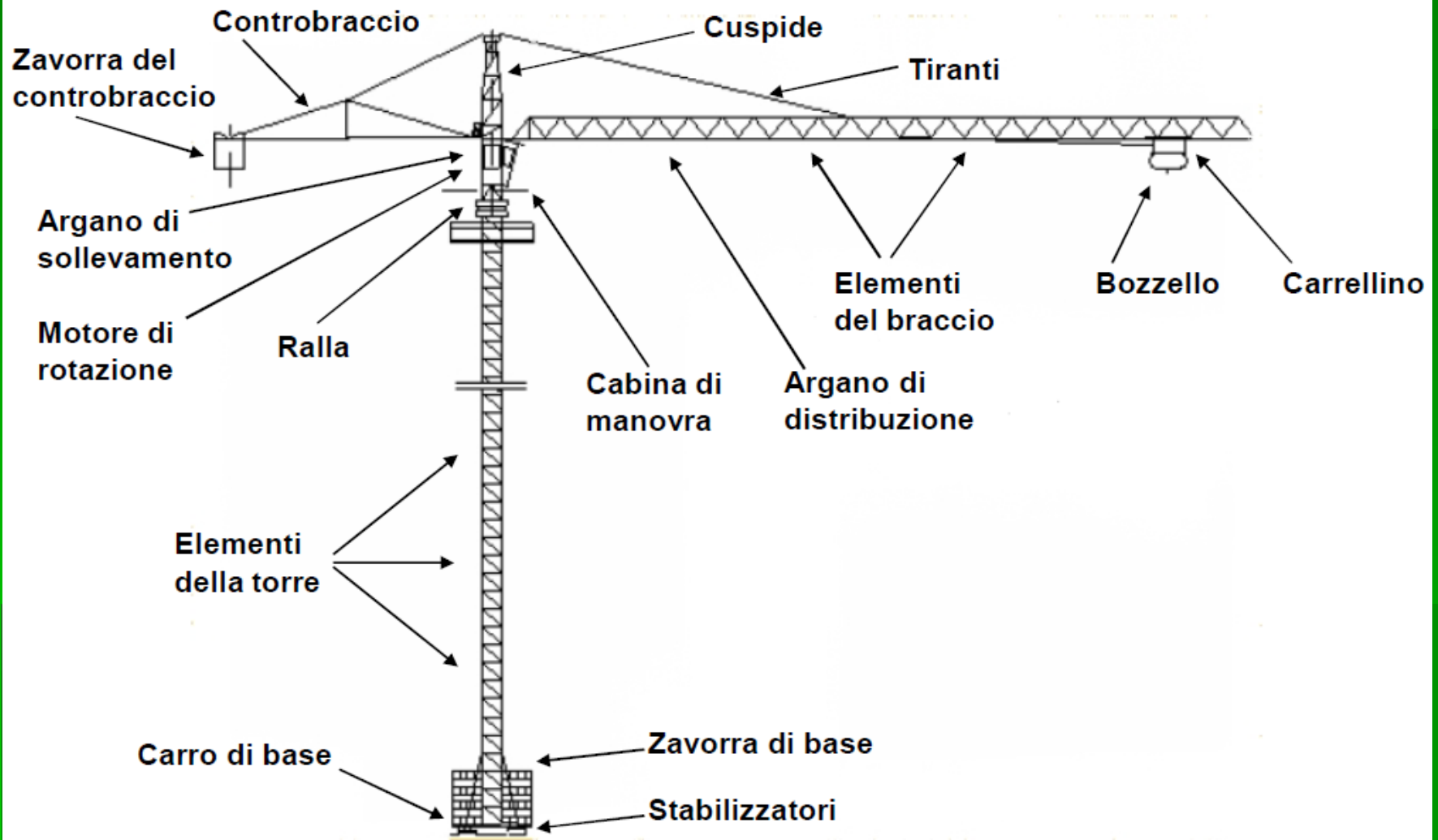


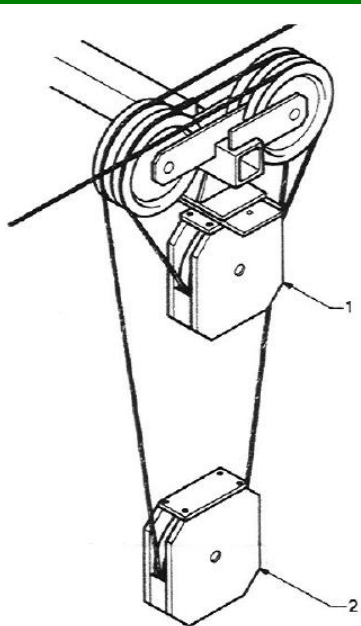
..... le conseguenze ... oggi !!!!!!!



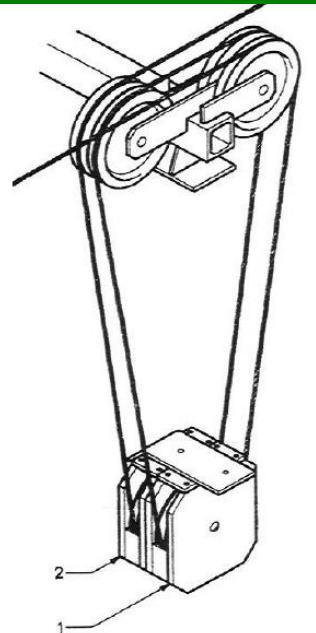
..... I disastri !!!!!

Ricerca di una soluzione



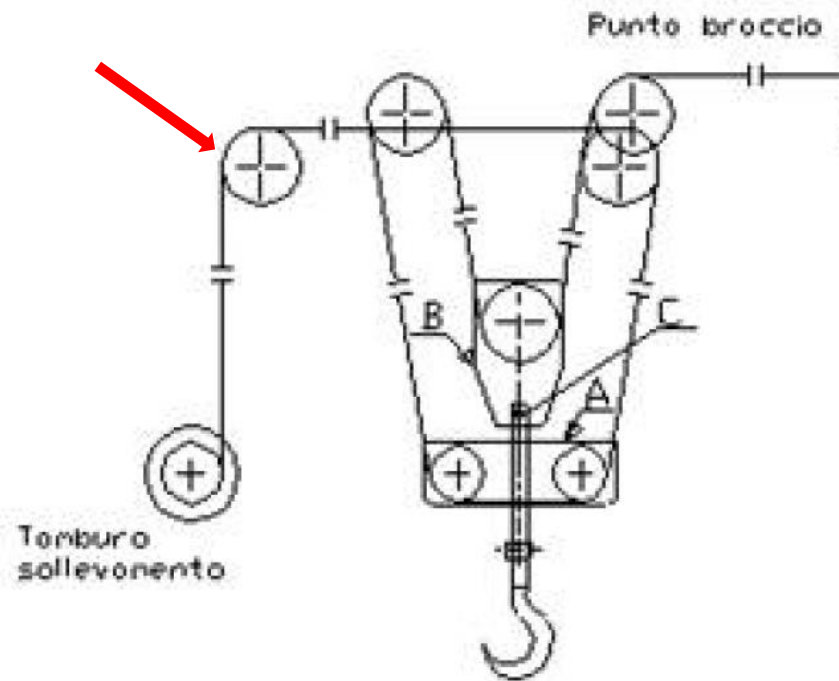
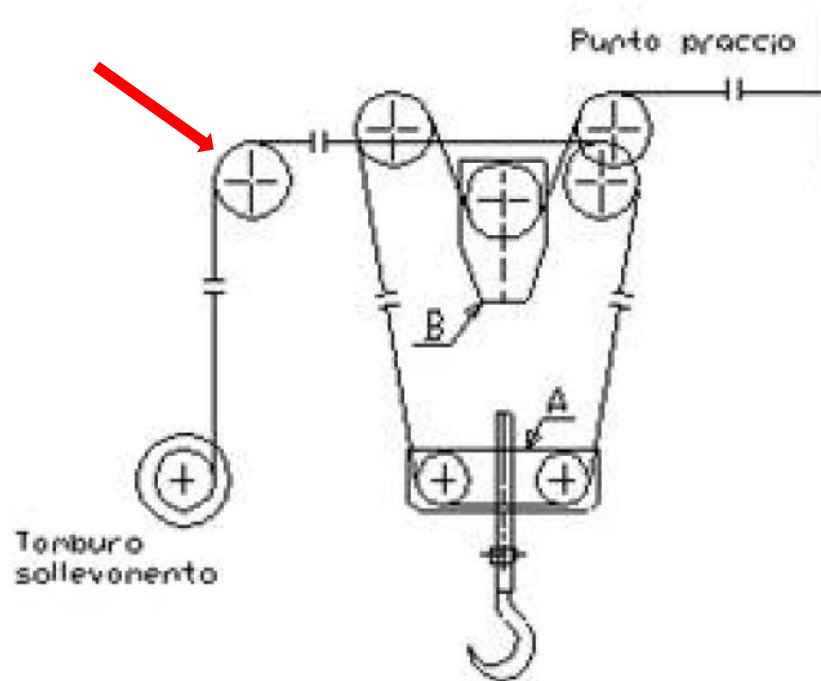


**Tiro in
seconda**



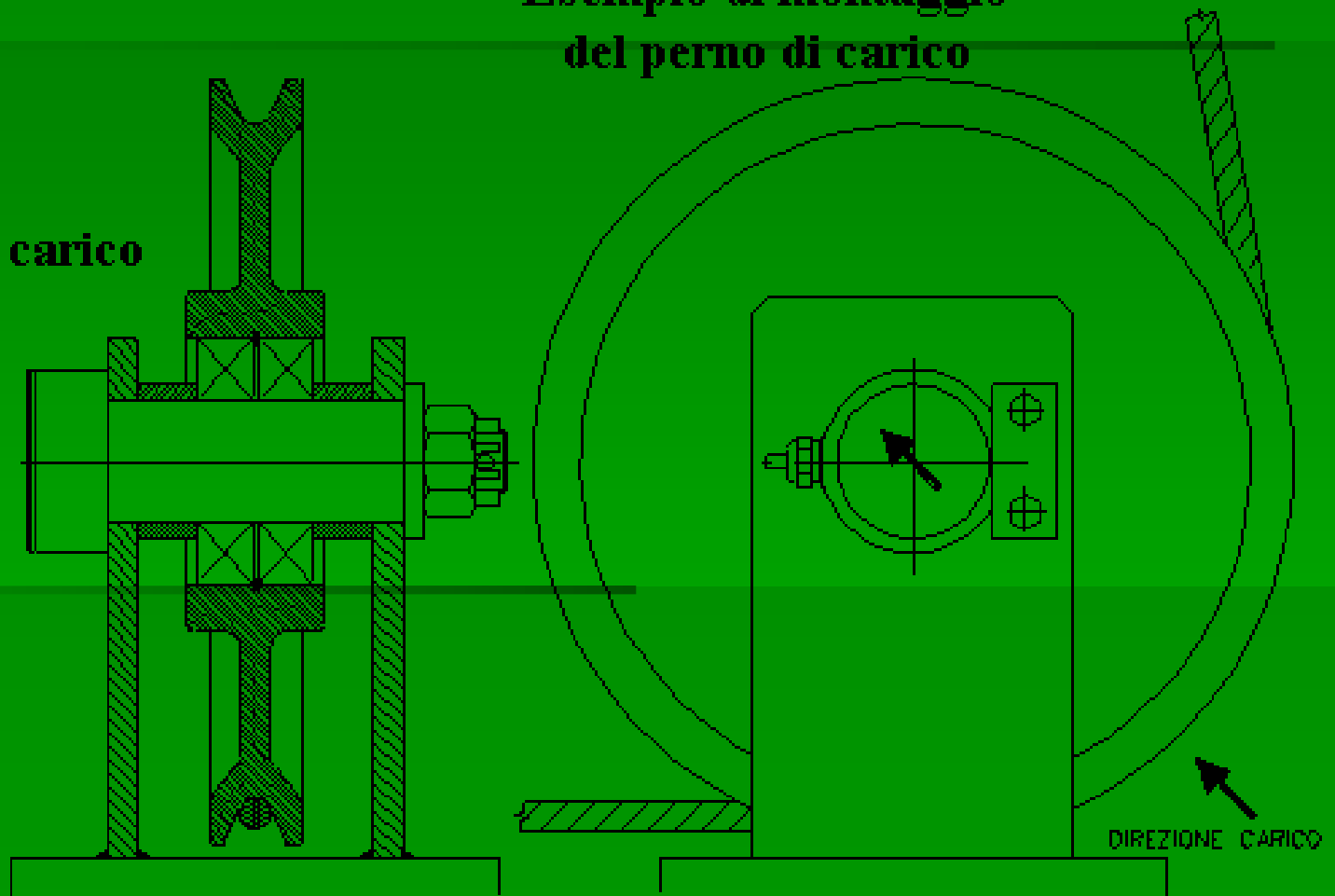
Ricerca di una soluzione

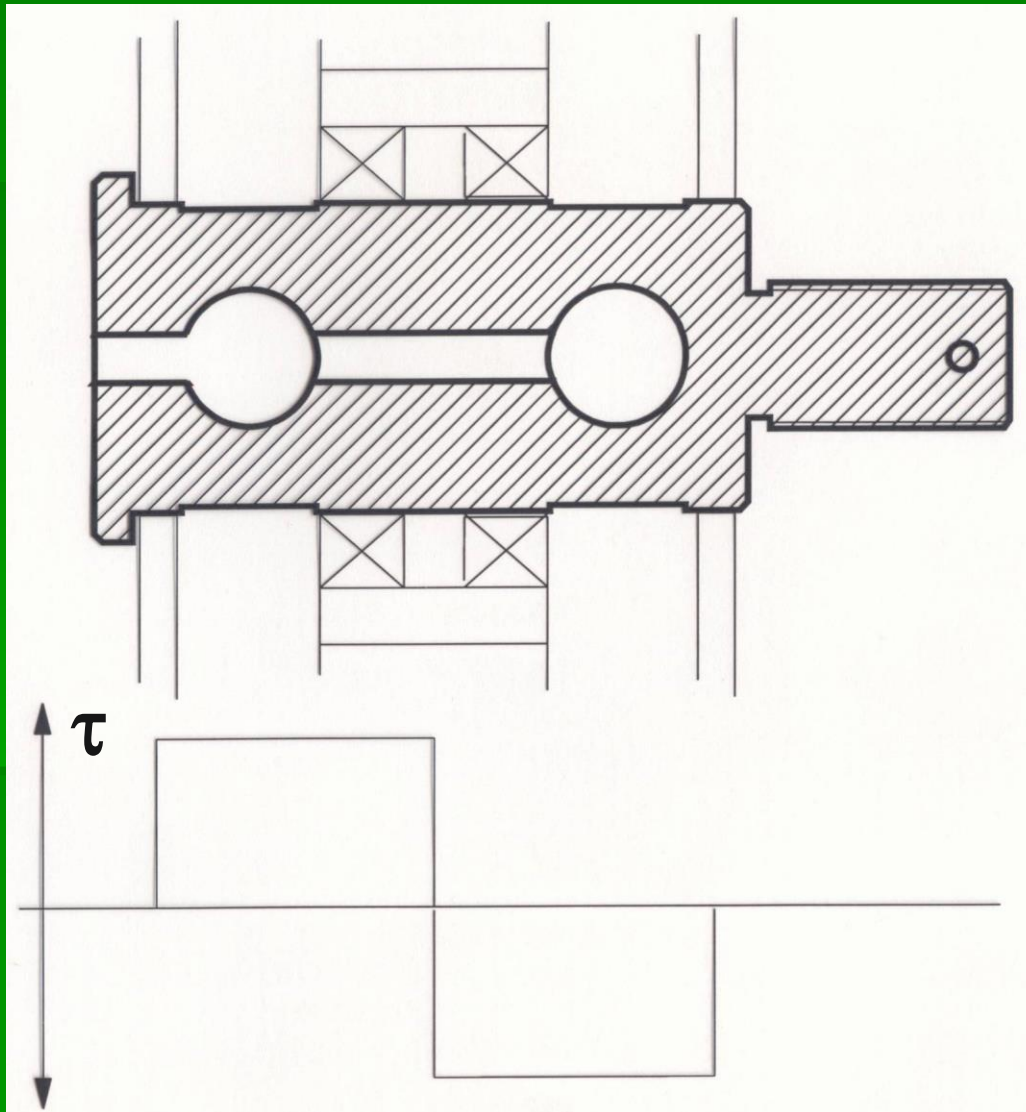
**Tiro in
quarta**



Esempio di montaggio del perno di carico

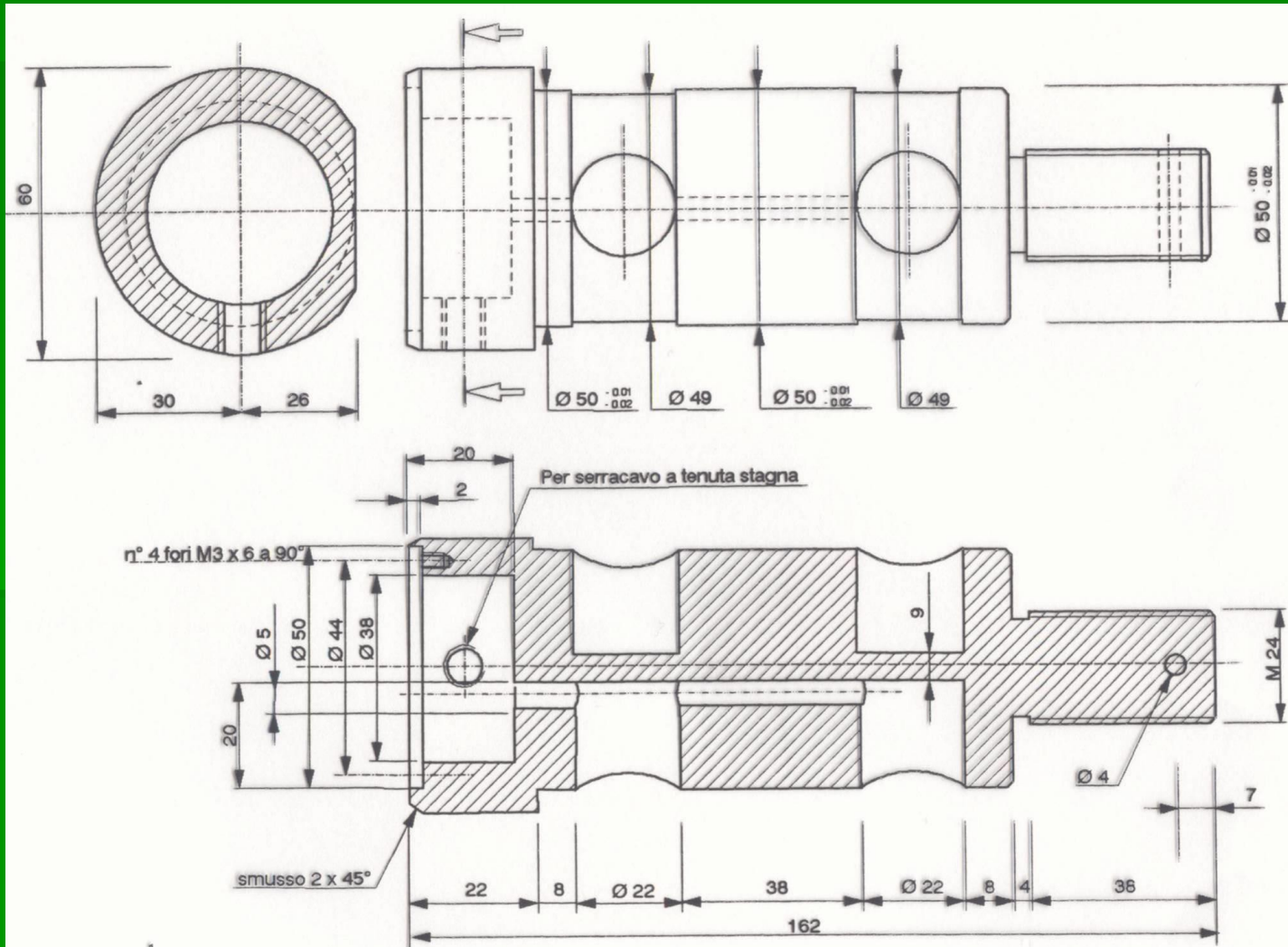
Cella di carico



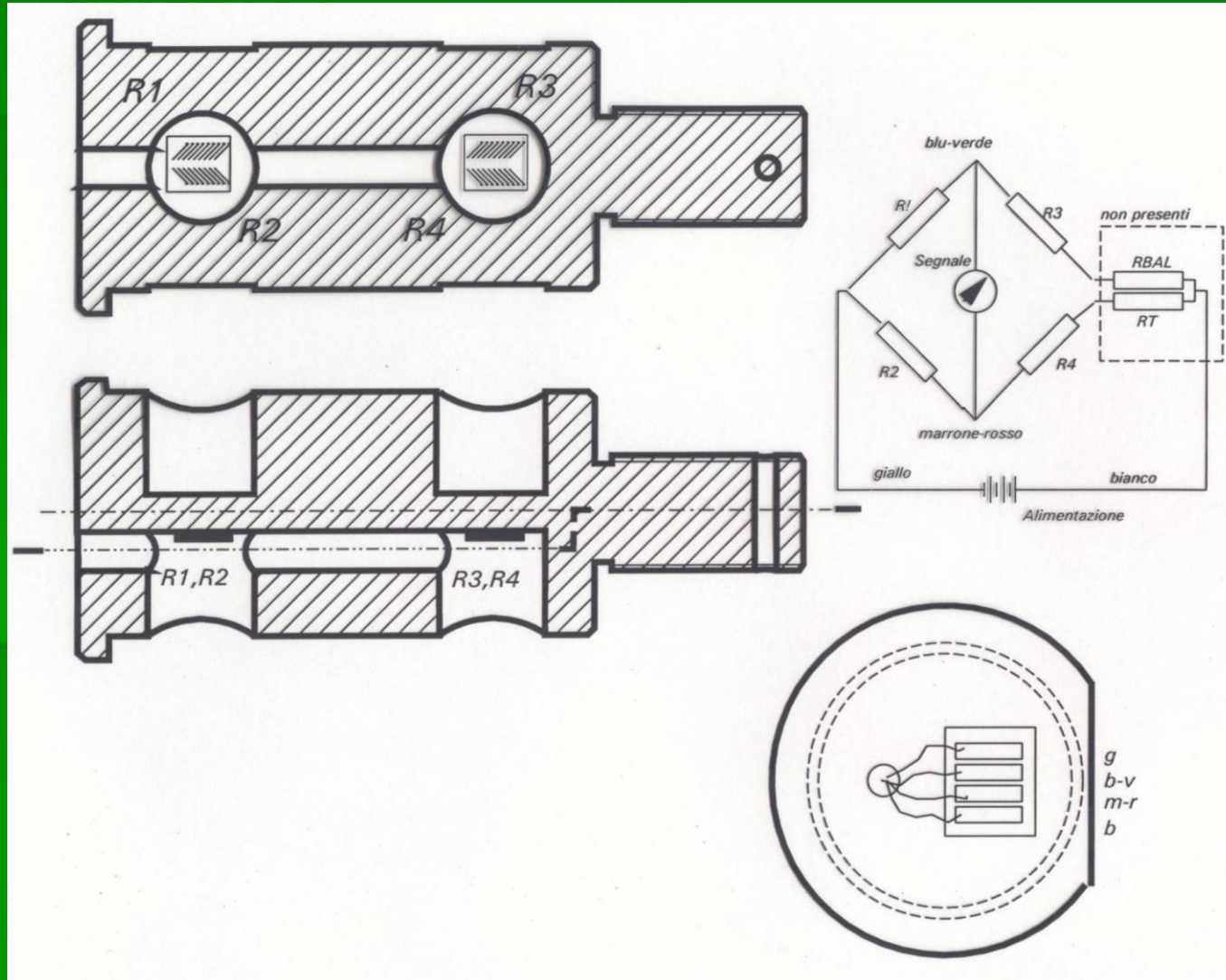


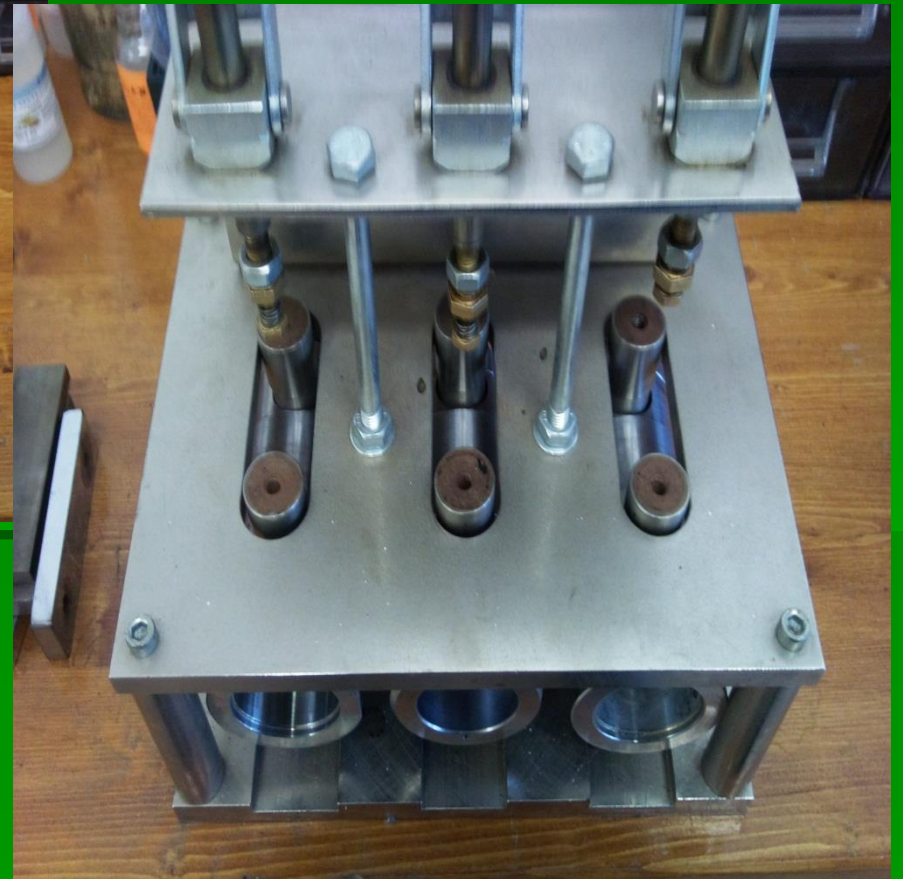
Idea Progettuale

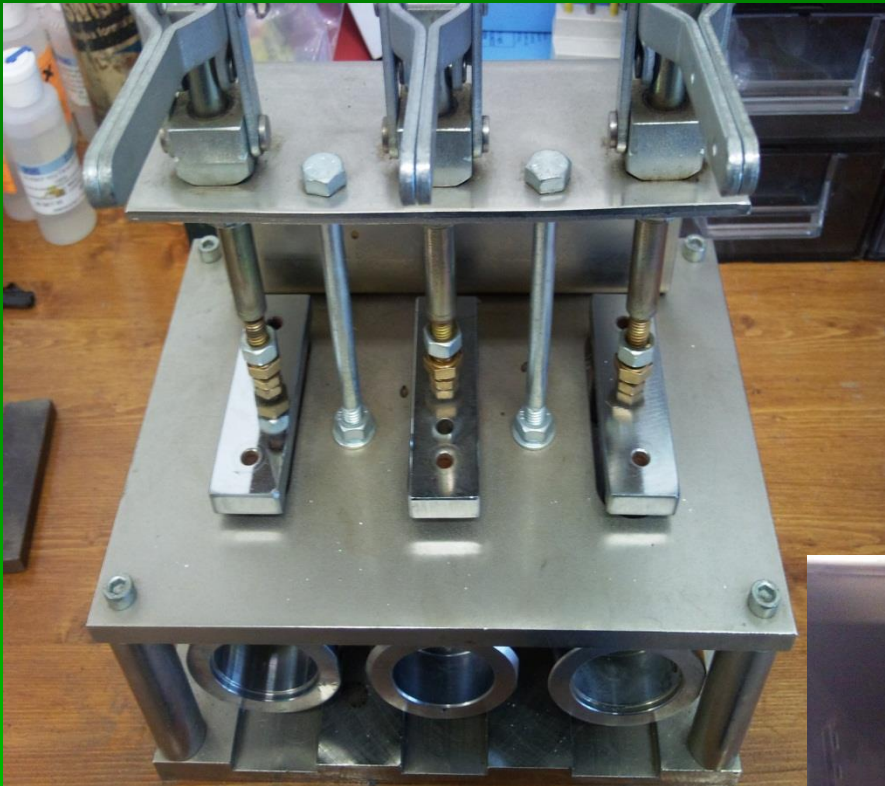
Disegno esecutivo



Strumentazione

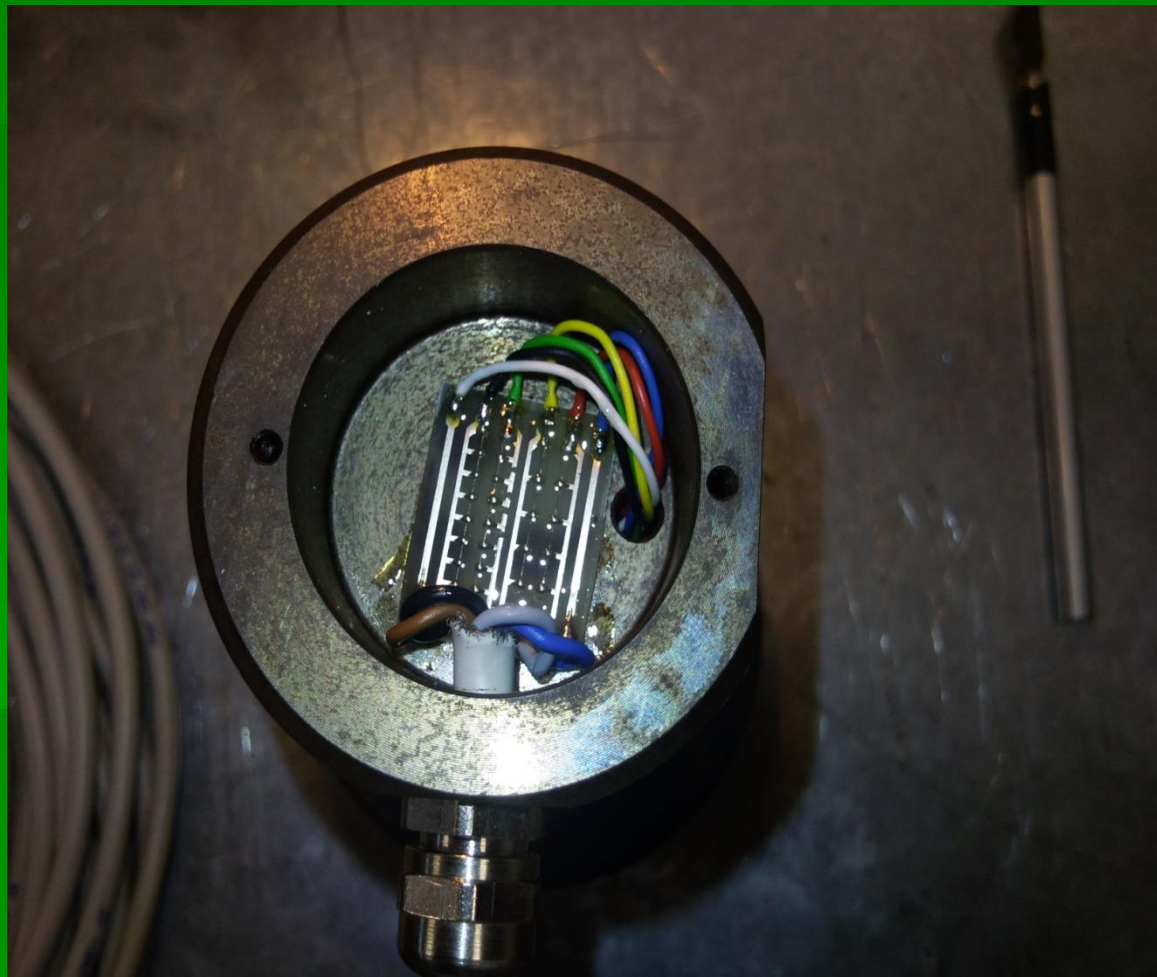








**Incollaggio e
cablaggio
estensimetri**



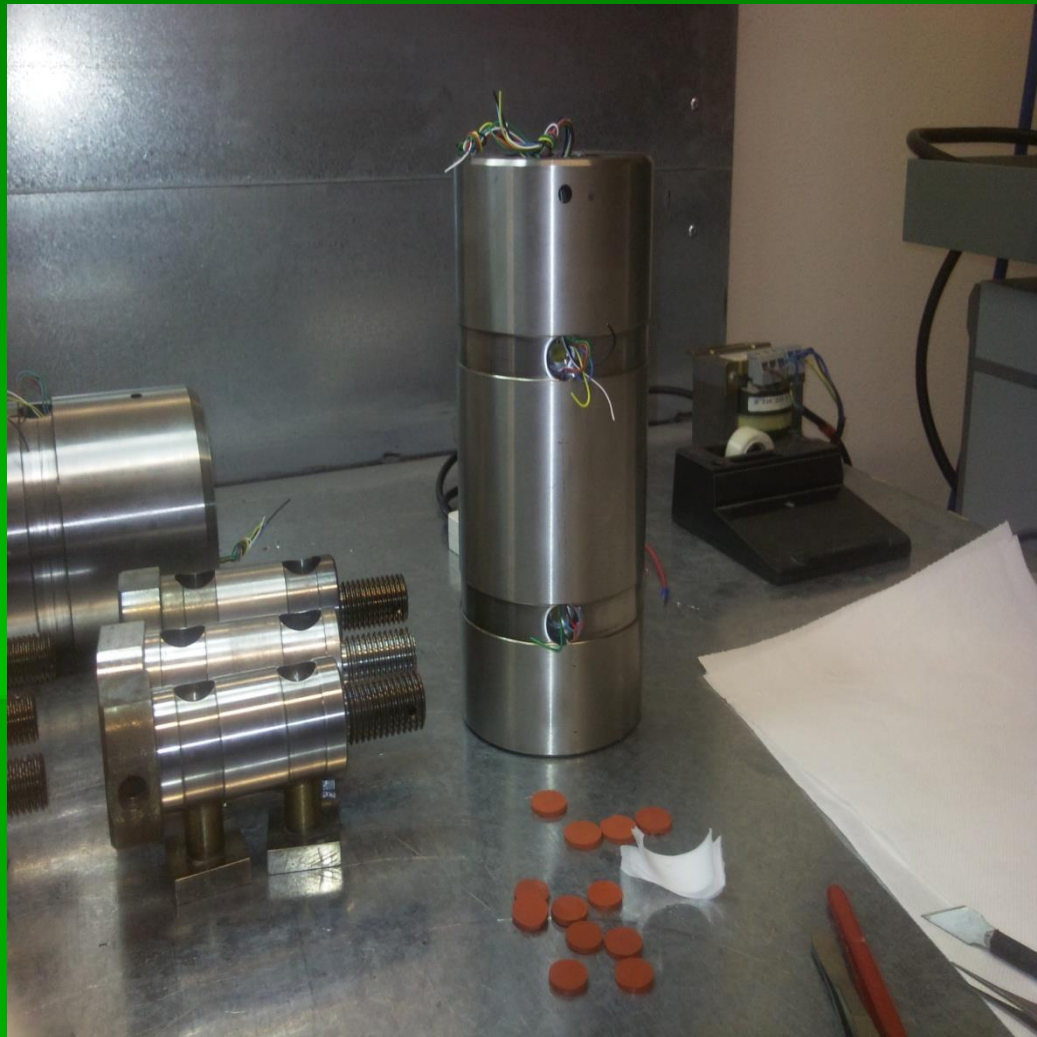
Azzeraemento

Il prodotto finito

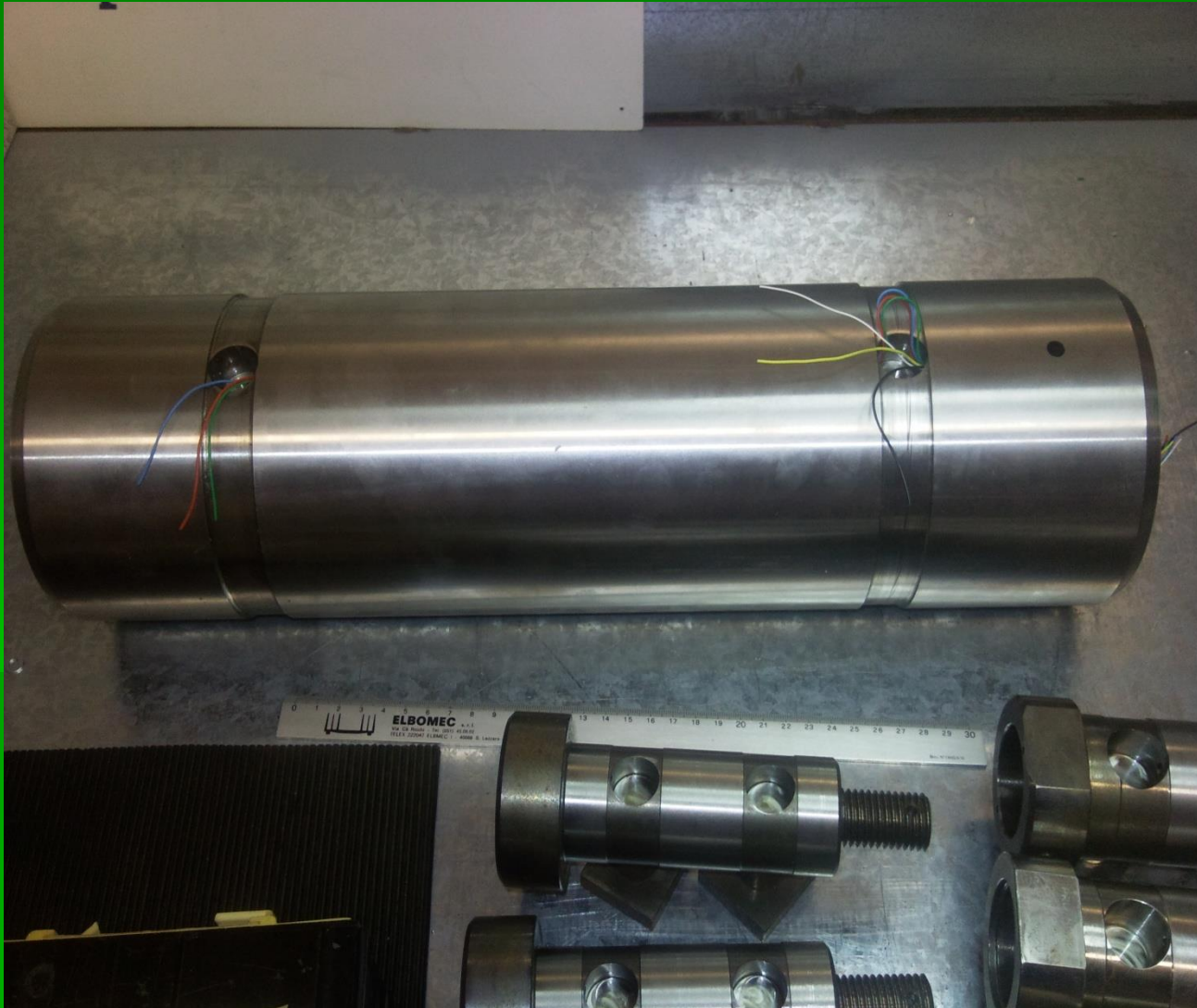


Nuovi prodotti

Celle di carico per
usi particolari



**Per carri ponte anche di notevole
dimensione (la cella pesa 48 Kg)**



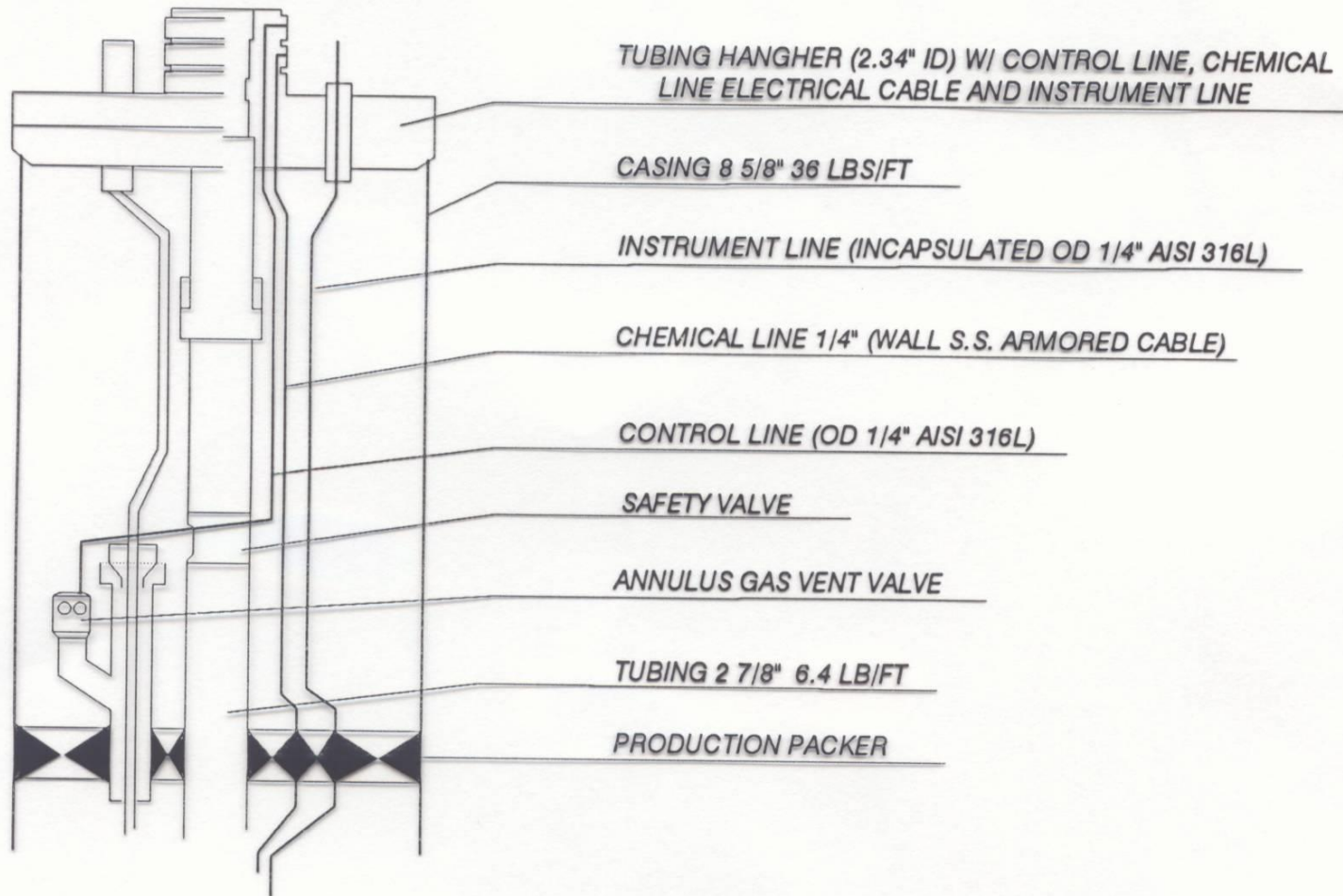
La ricerca e produzione di idrocarburi

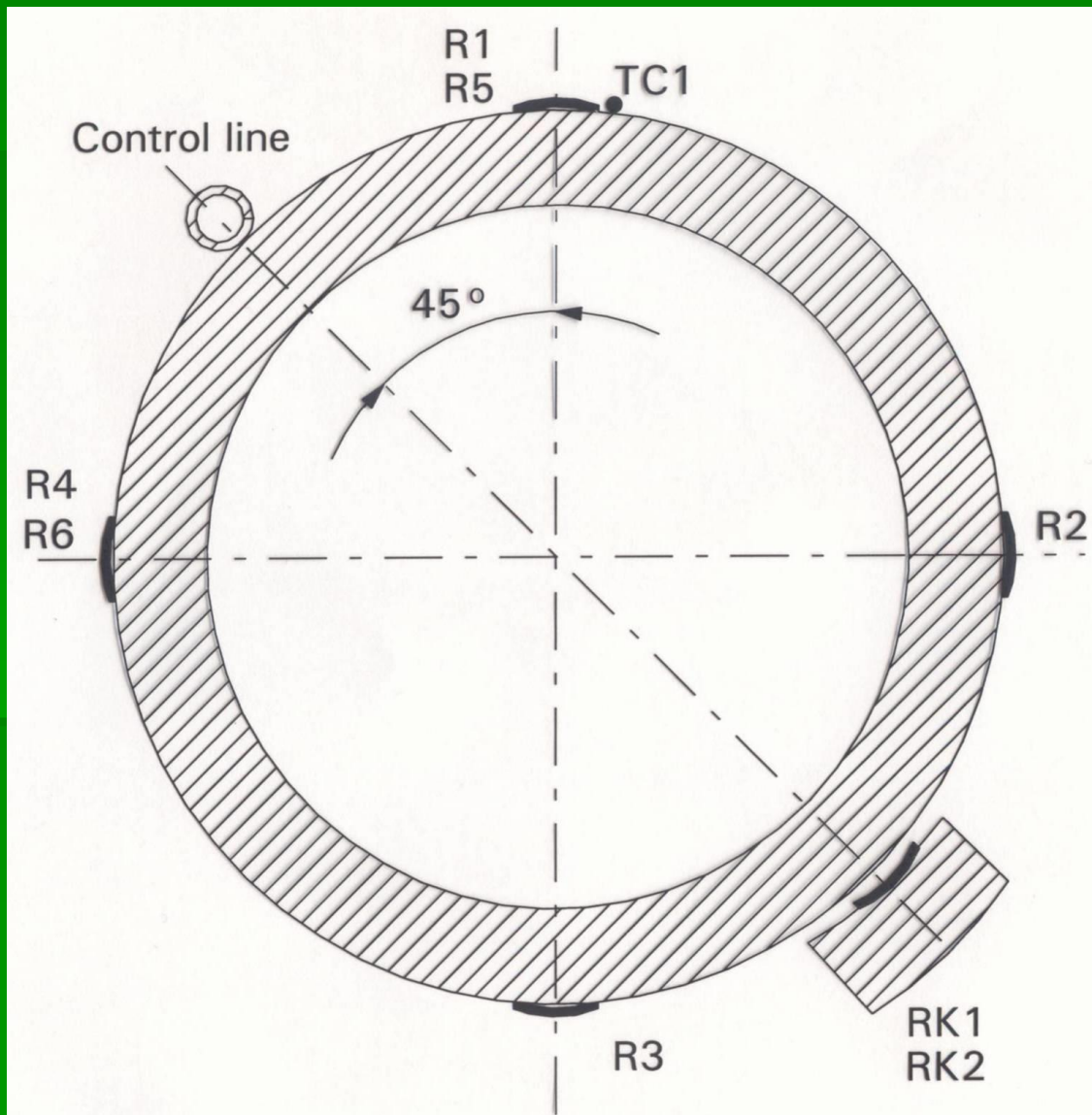
27 metri



11 metri

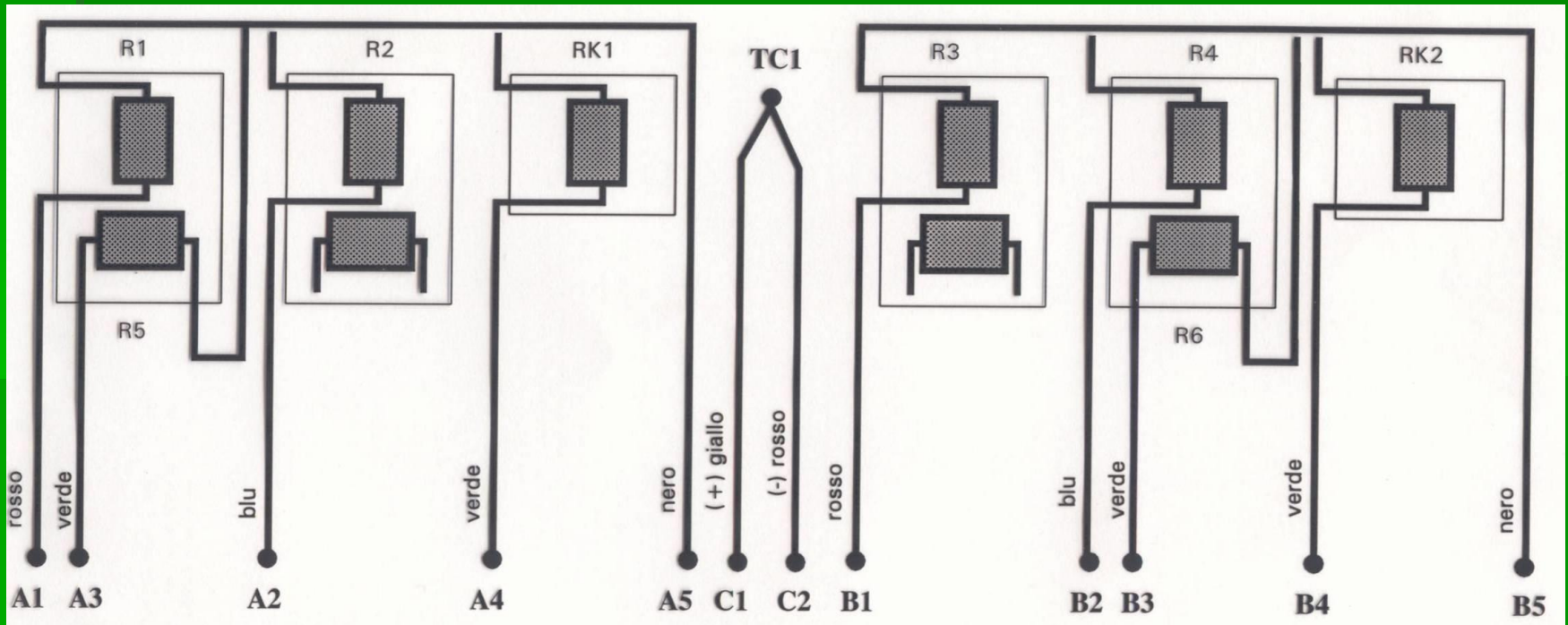
Schema completamento pozzo





Disposizione estensimetri

Schema collegamenti



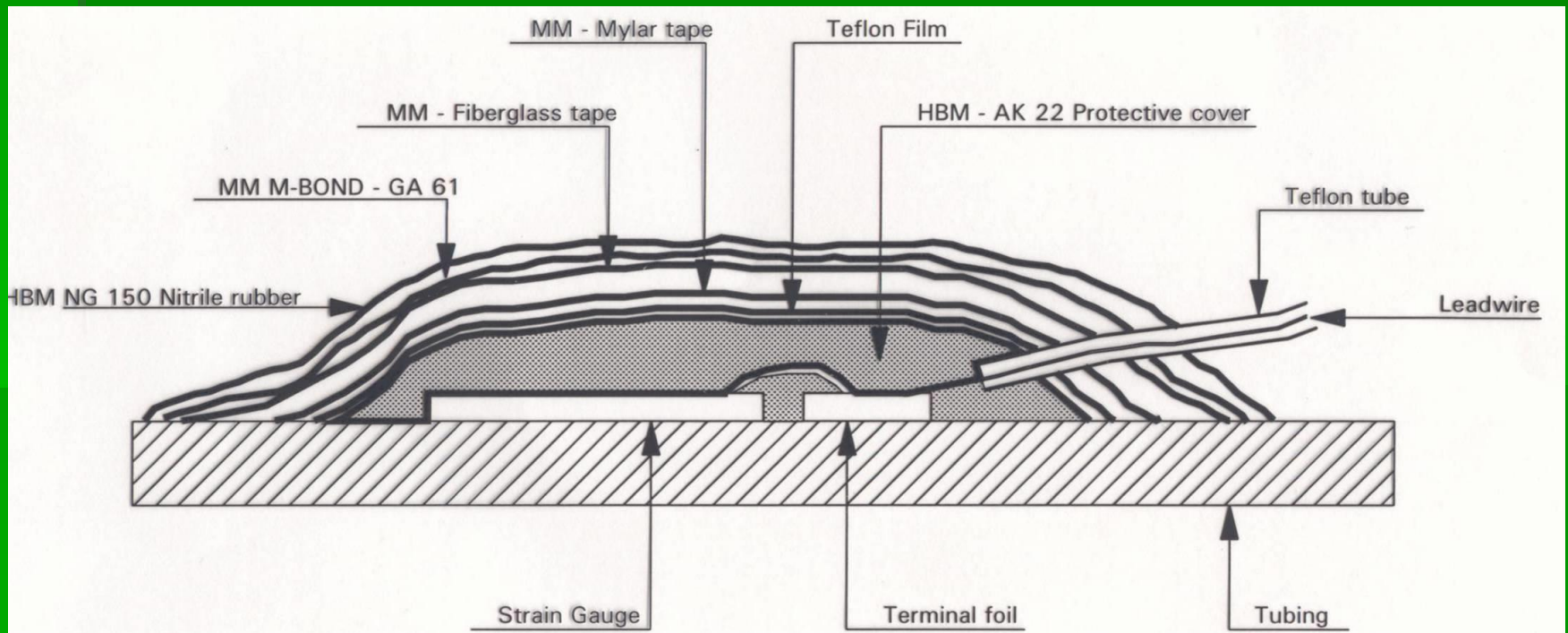
Protezione del punto di misura

La protezione del punto di misura deve essere in grado di resistere all'effetto combinato di:

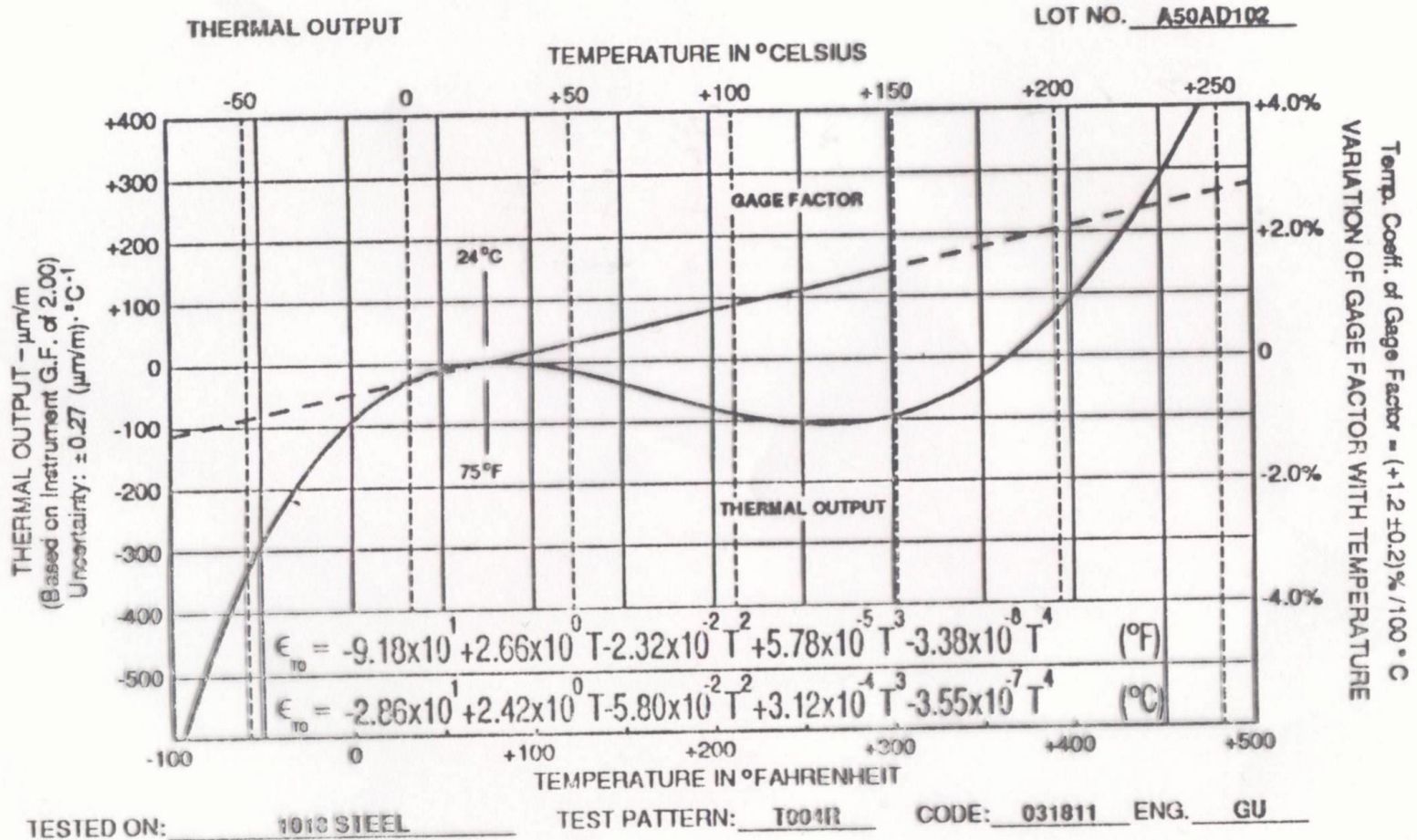
- Erosione del fango durante lo spiazzamento dello stesso
- Temperatura crescente durante lo spiazzamento del fango (150 °C a regime)

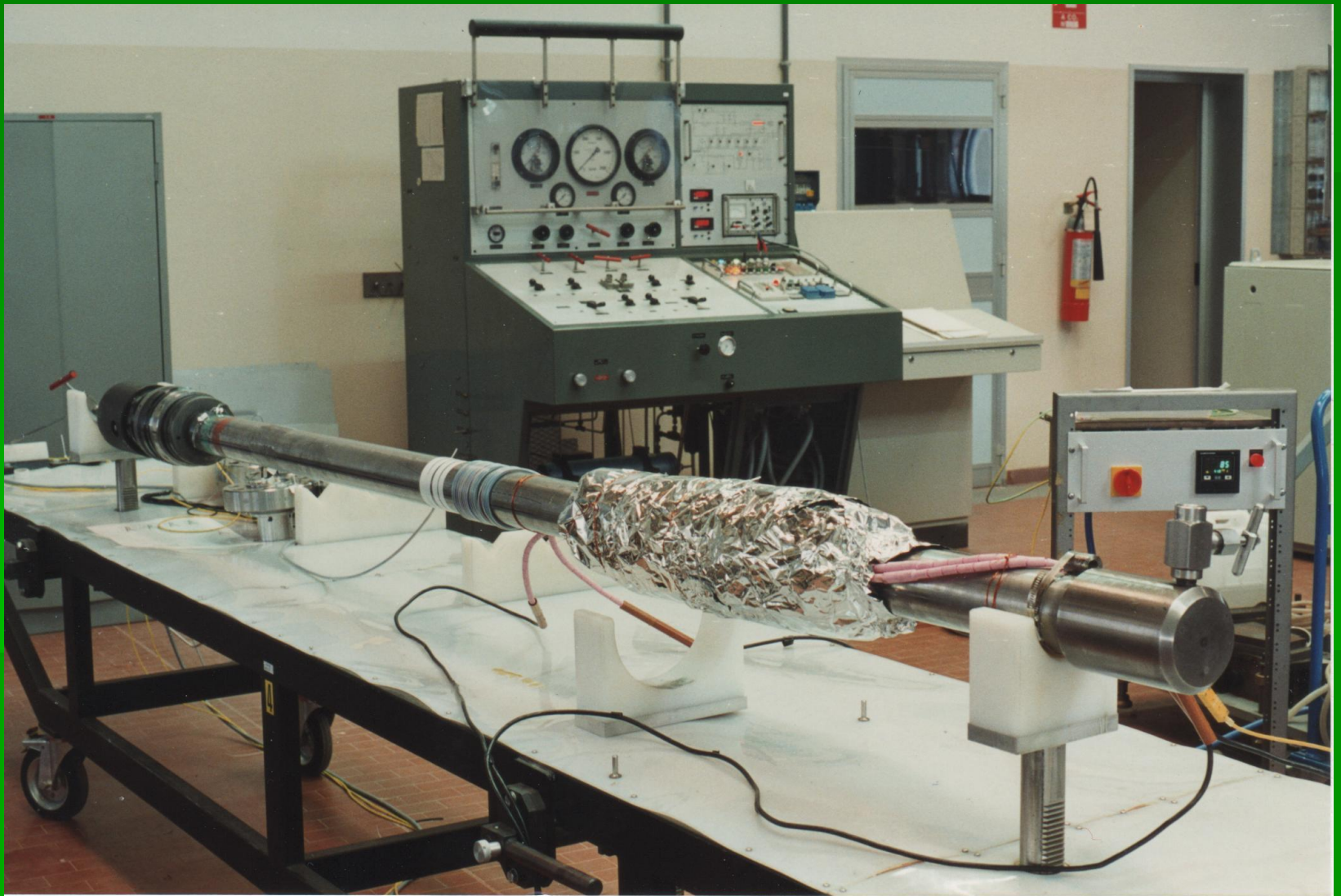
Deve essere inoltre in grado di sopportare, senza deteriorarsi, l'azione aggressiva del gasolio che viene utilizzato per lo spiazzamento del fango ed il lavaggio finale della colonna

Protezione del punto di misura

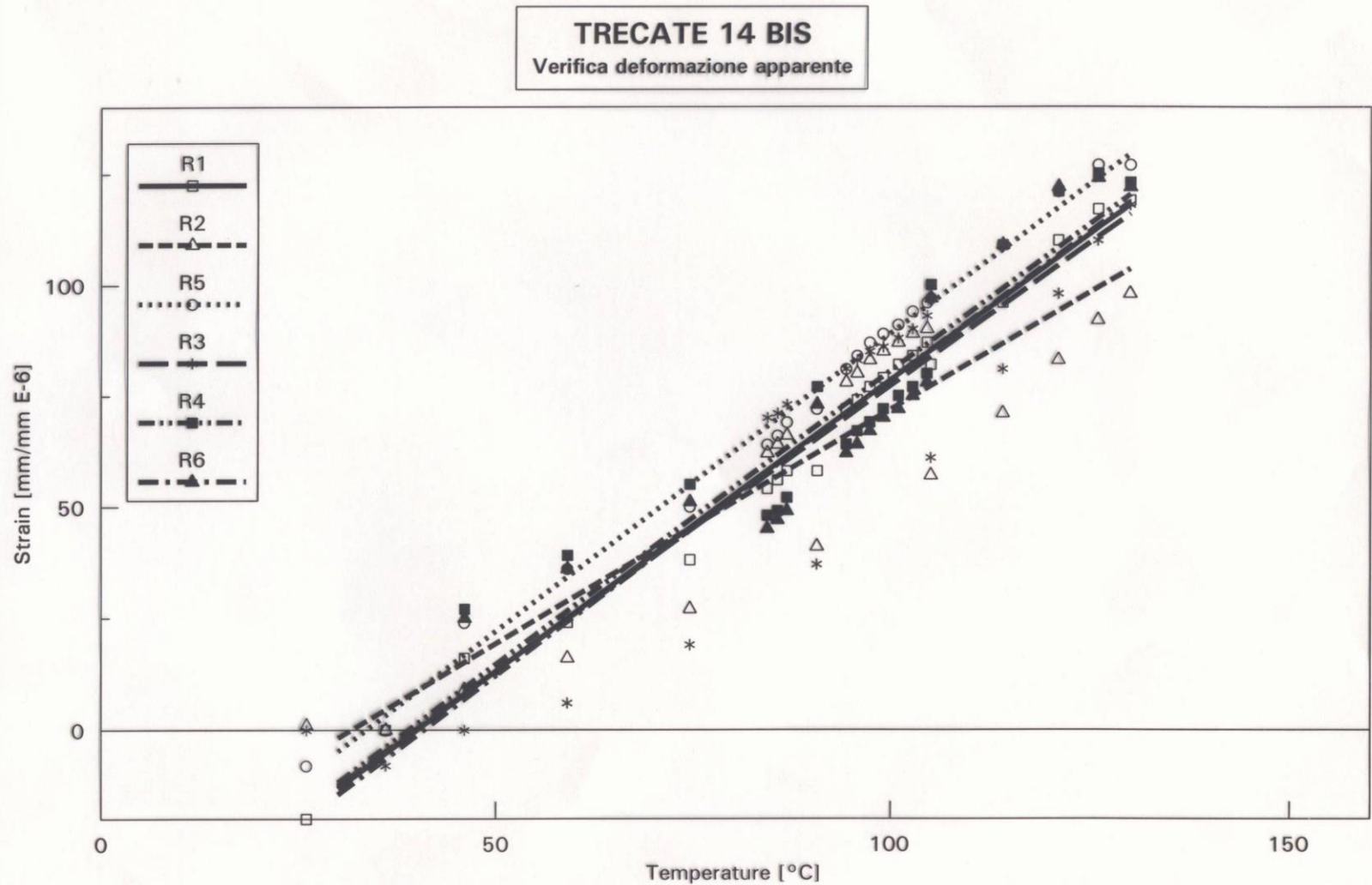


Taratura dell'estensimetro

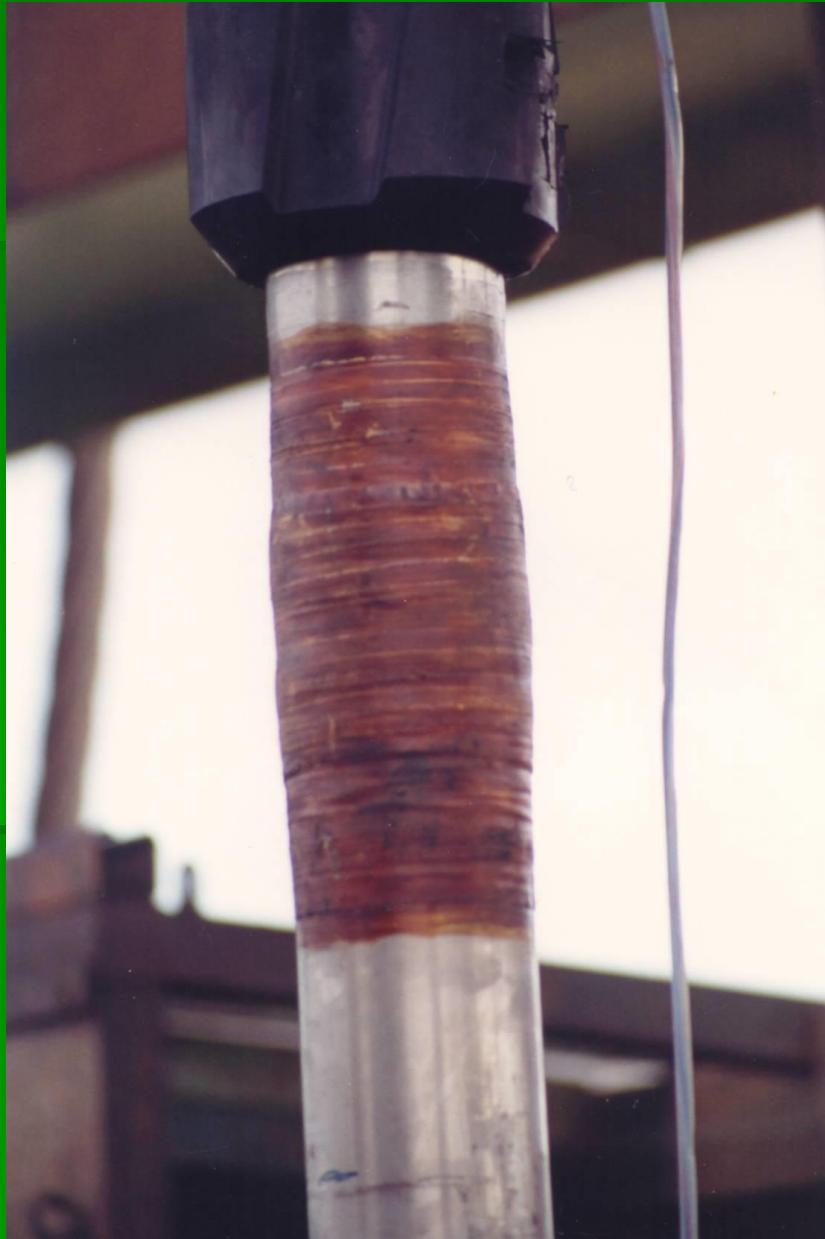




Calibrazione del punto di misura







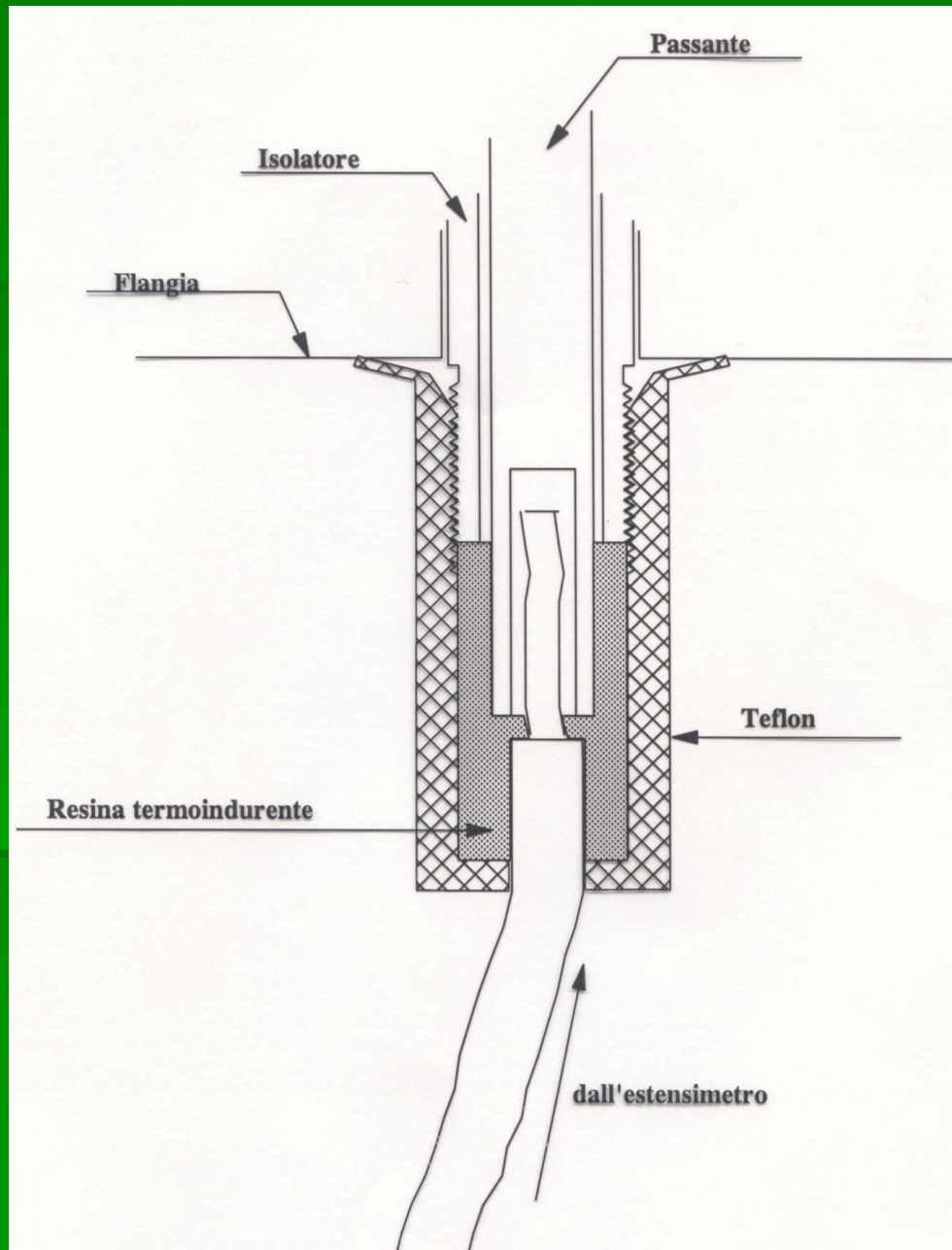
**Pup joint
strumentato
e protetto**



**Discesa in
pozzo**

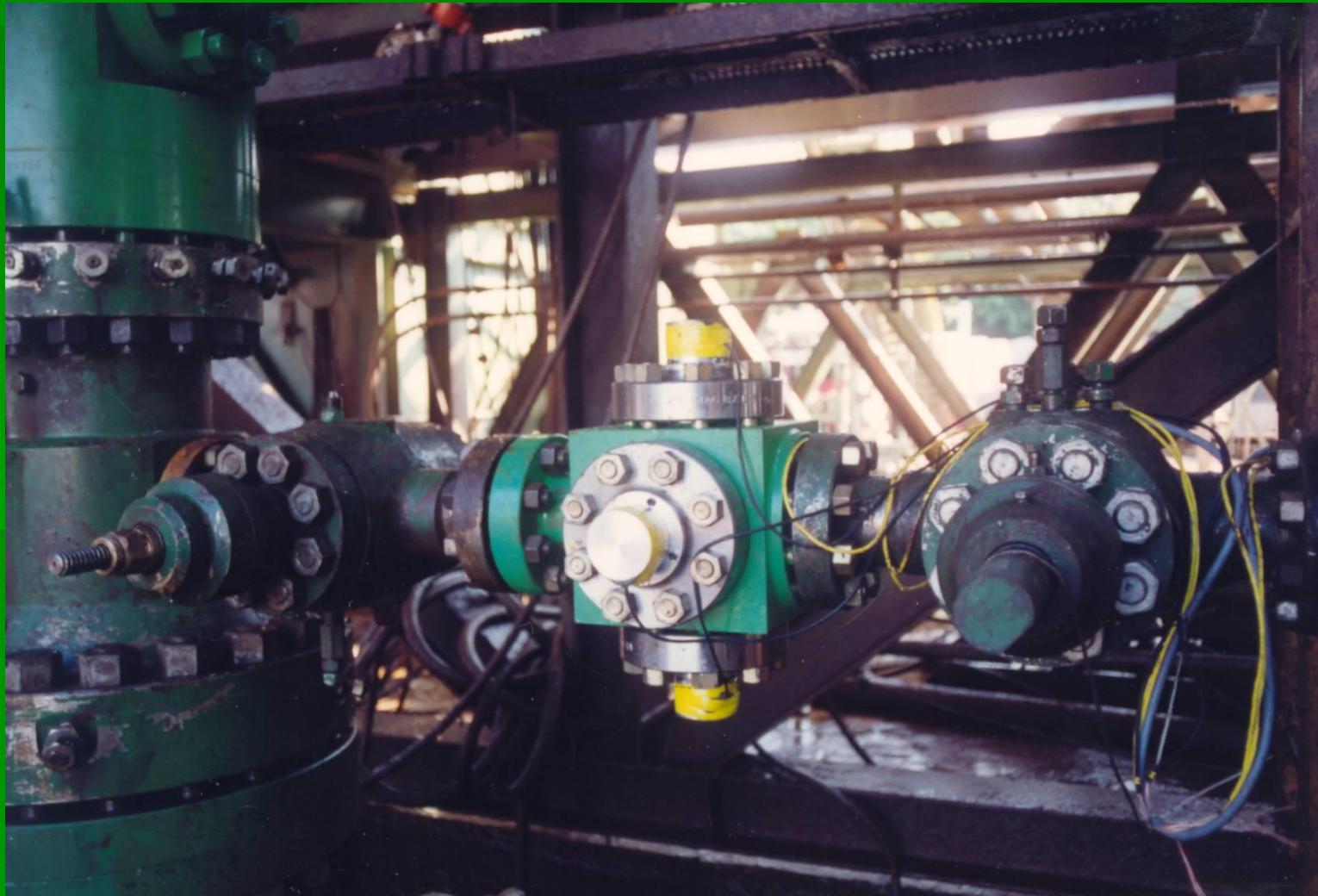
Flangia passacavo



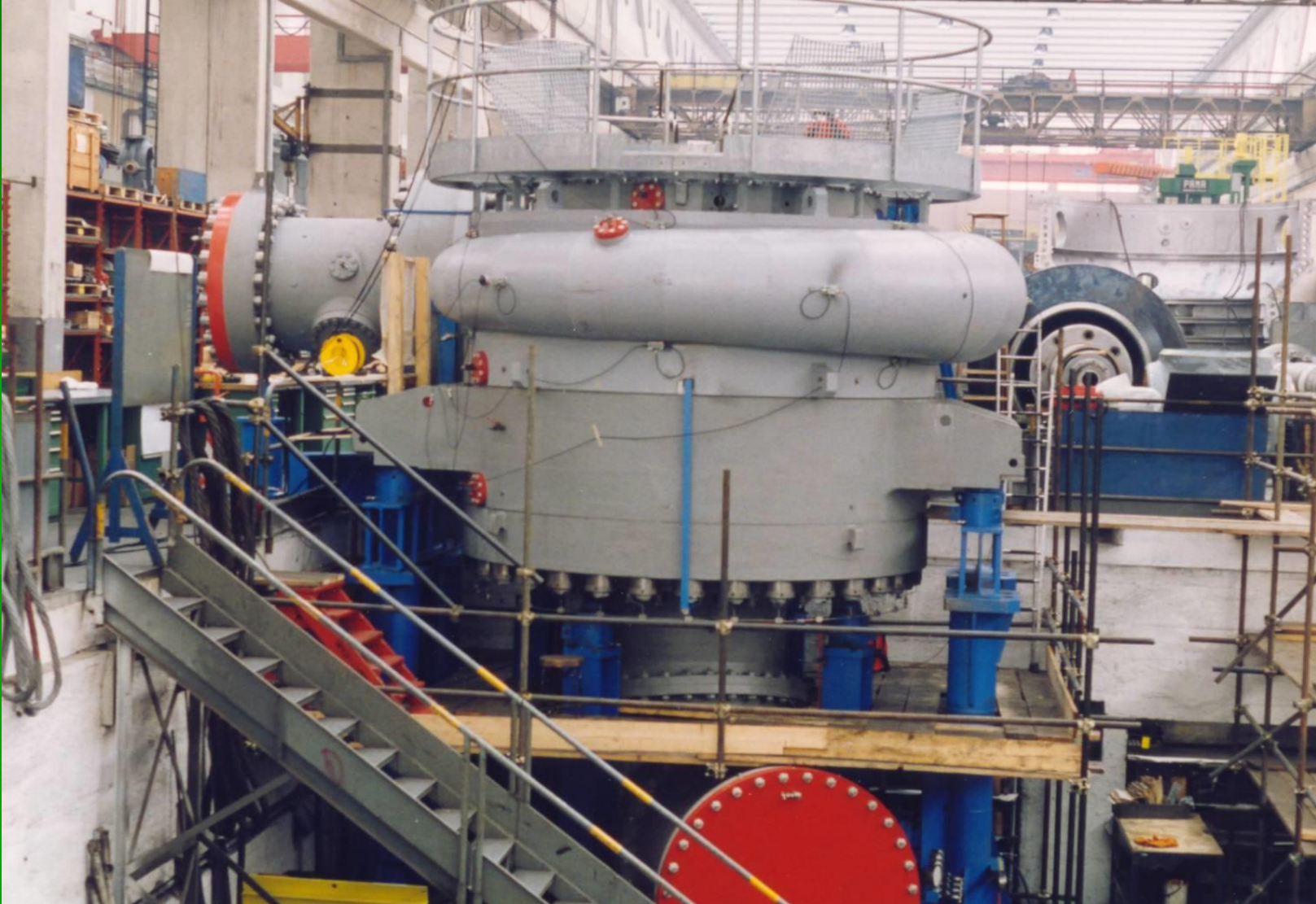


**Isolamento
interno
sulla
flangia**

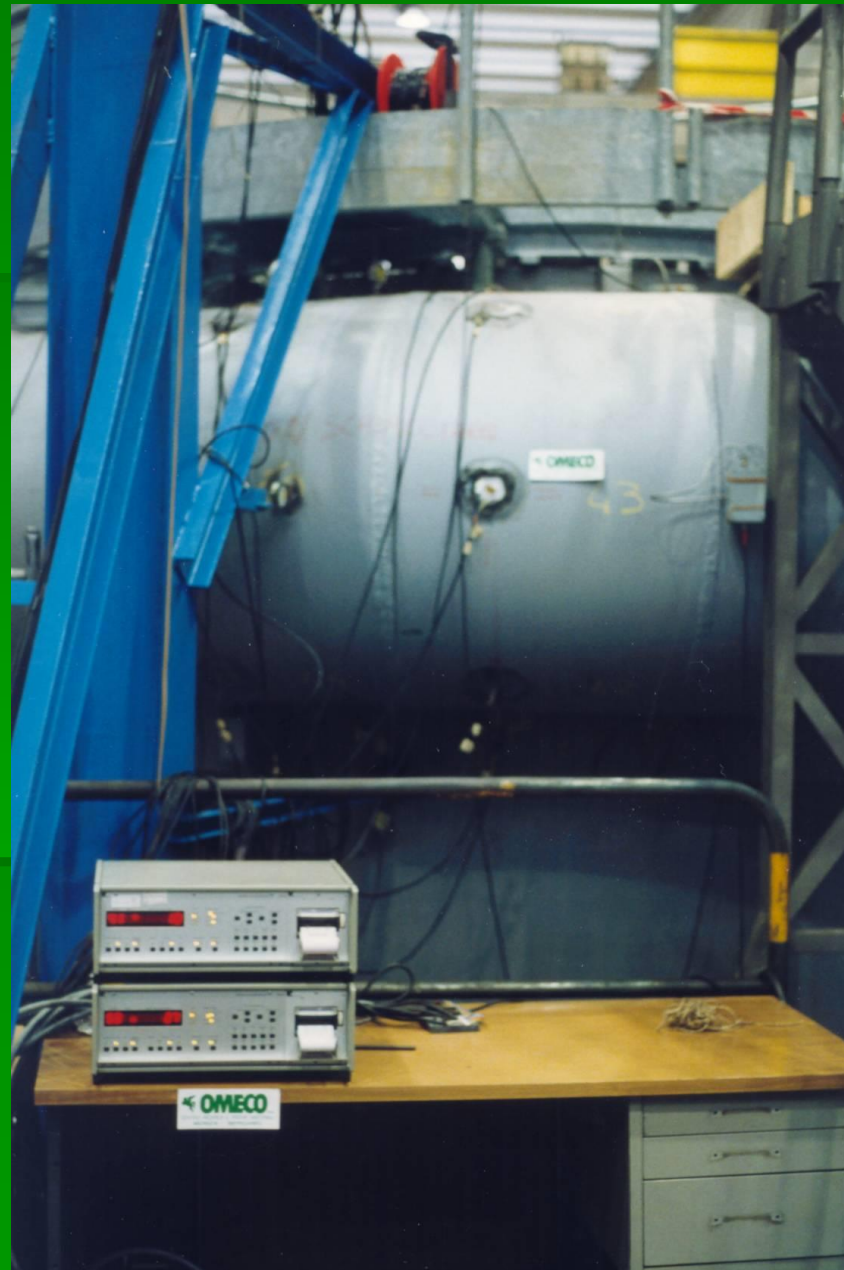
Cablaggio sulle flangie e montaggio su “Christmas tree”



Il predistributore per turbina

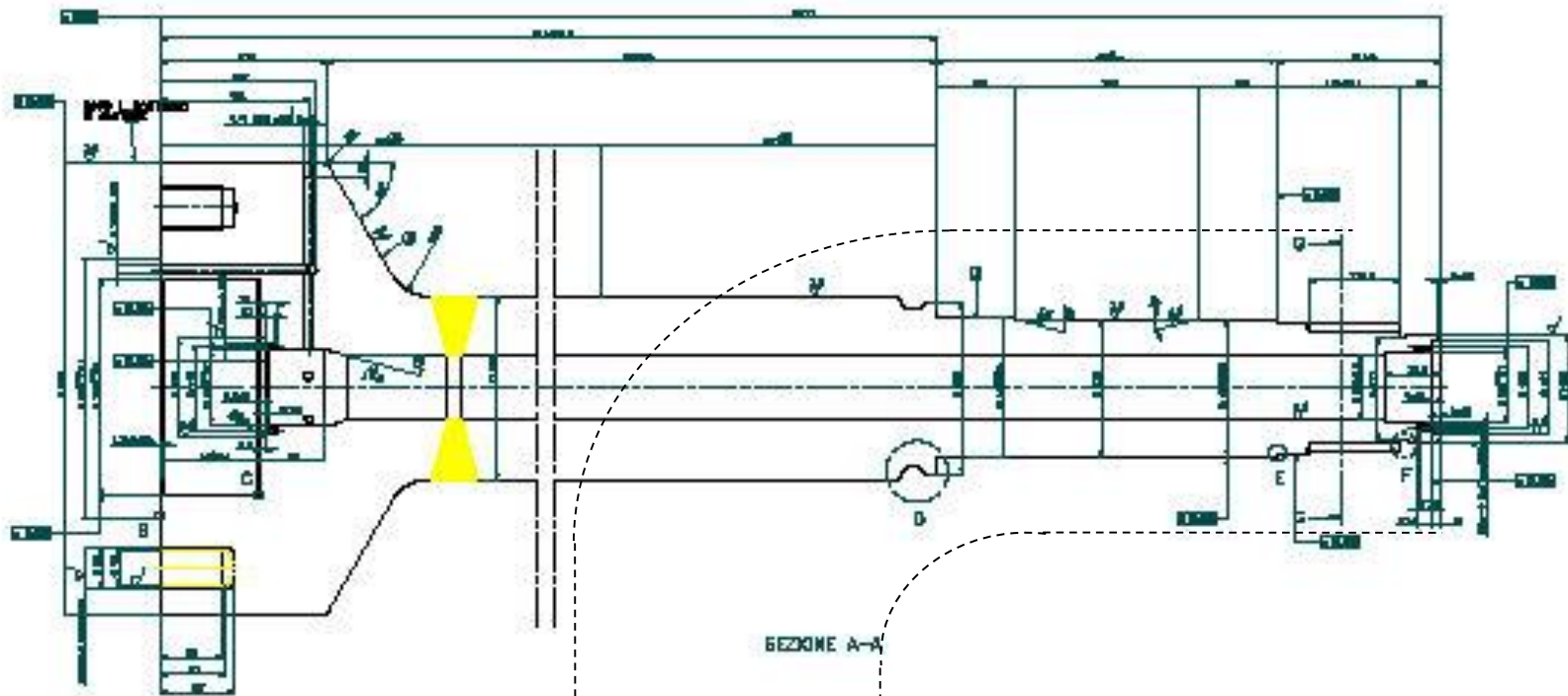






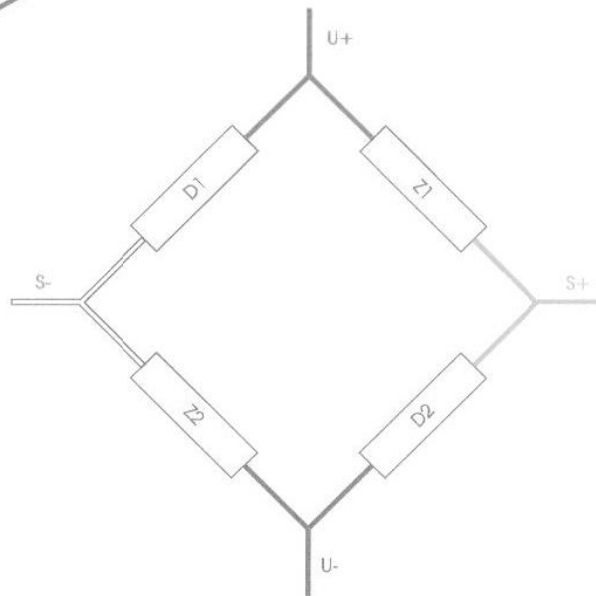
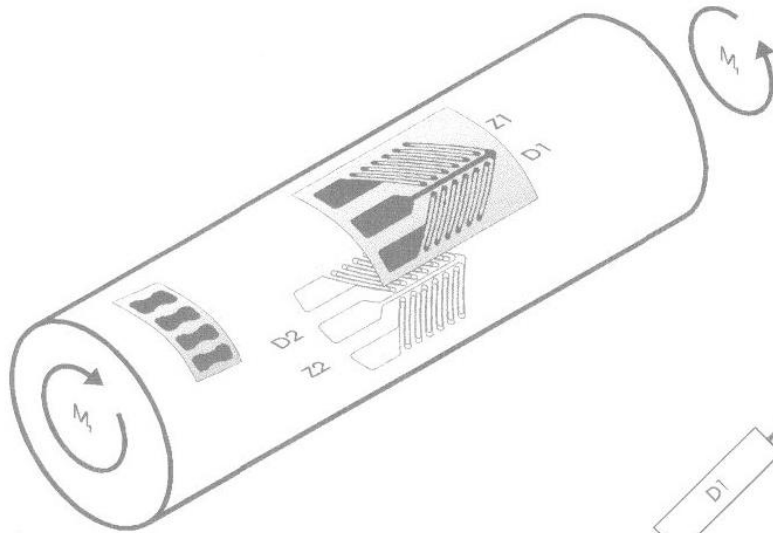


L'albero della turbina



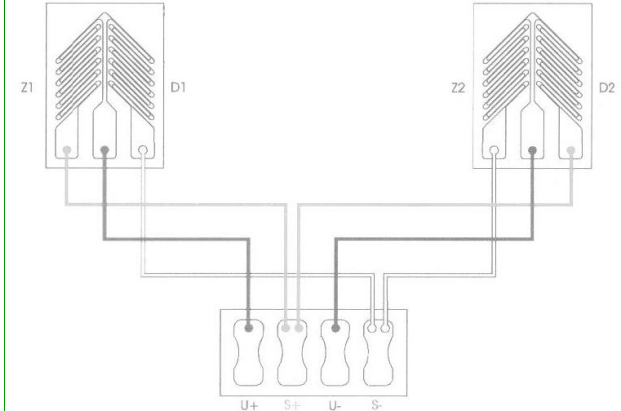






Z = Zugdehnung
 D = Druckdehnung
 U = Speisespannung
 S = Signal

Schema collegamento



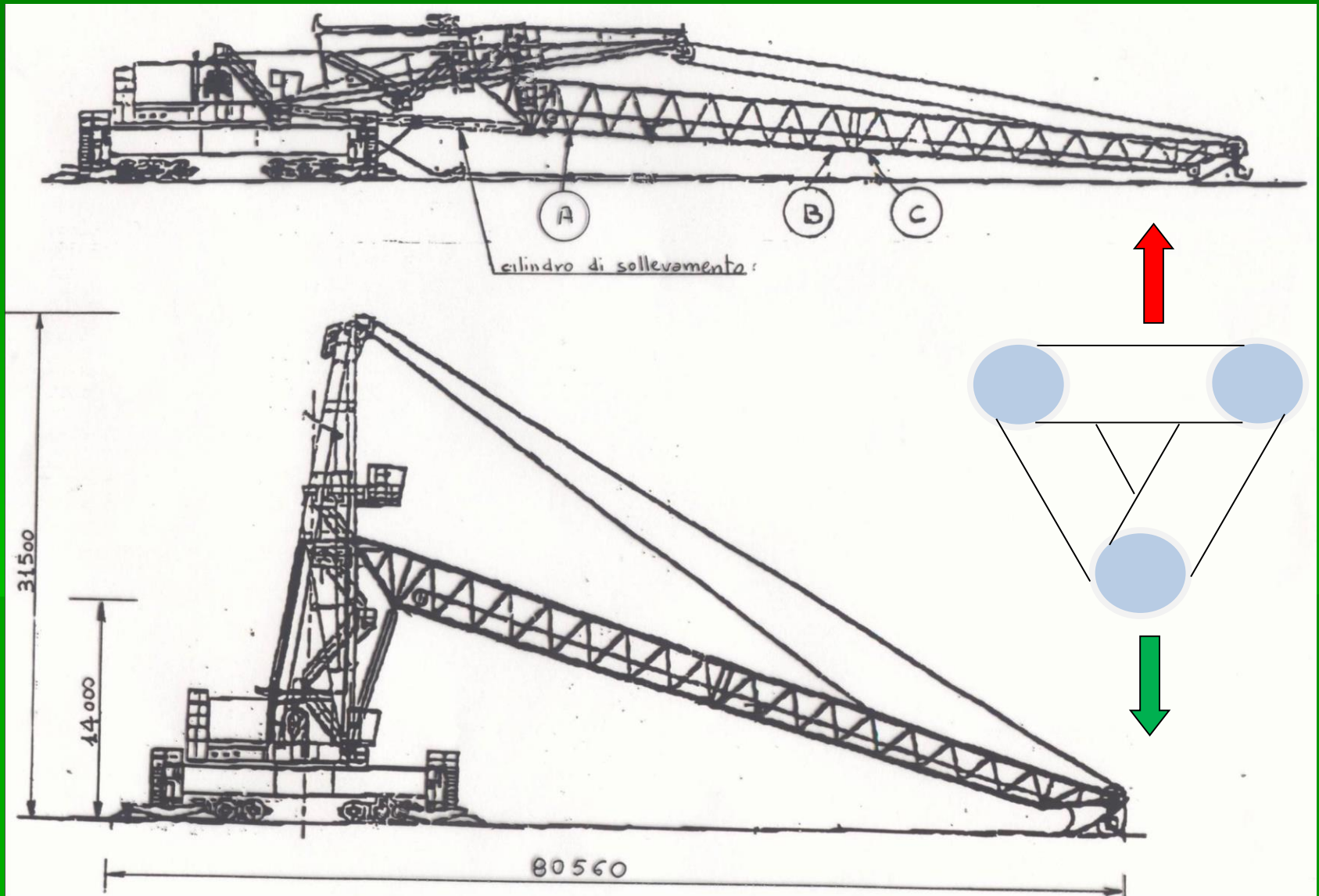






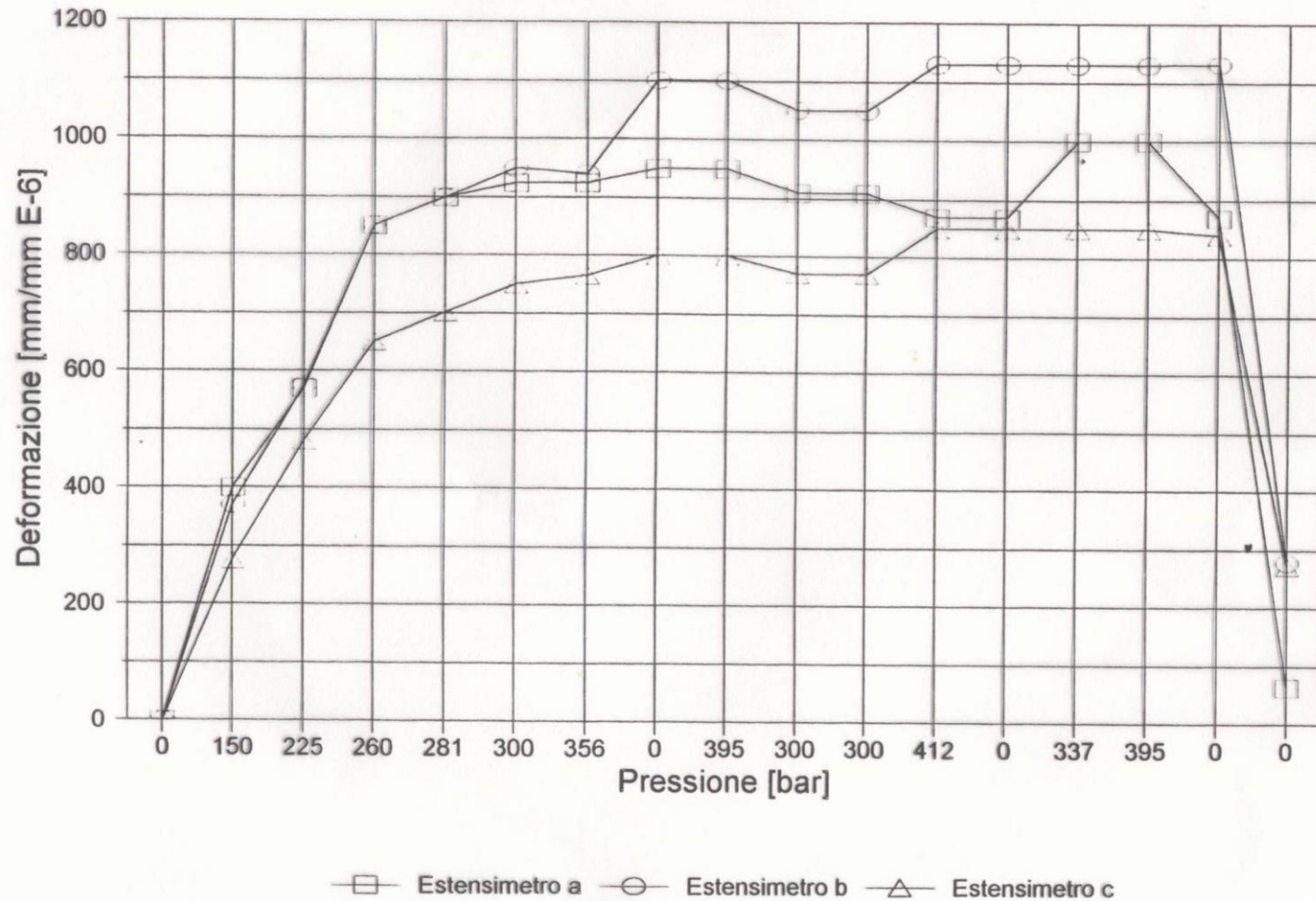


La gru semovente da banchina

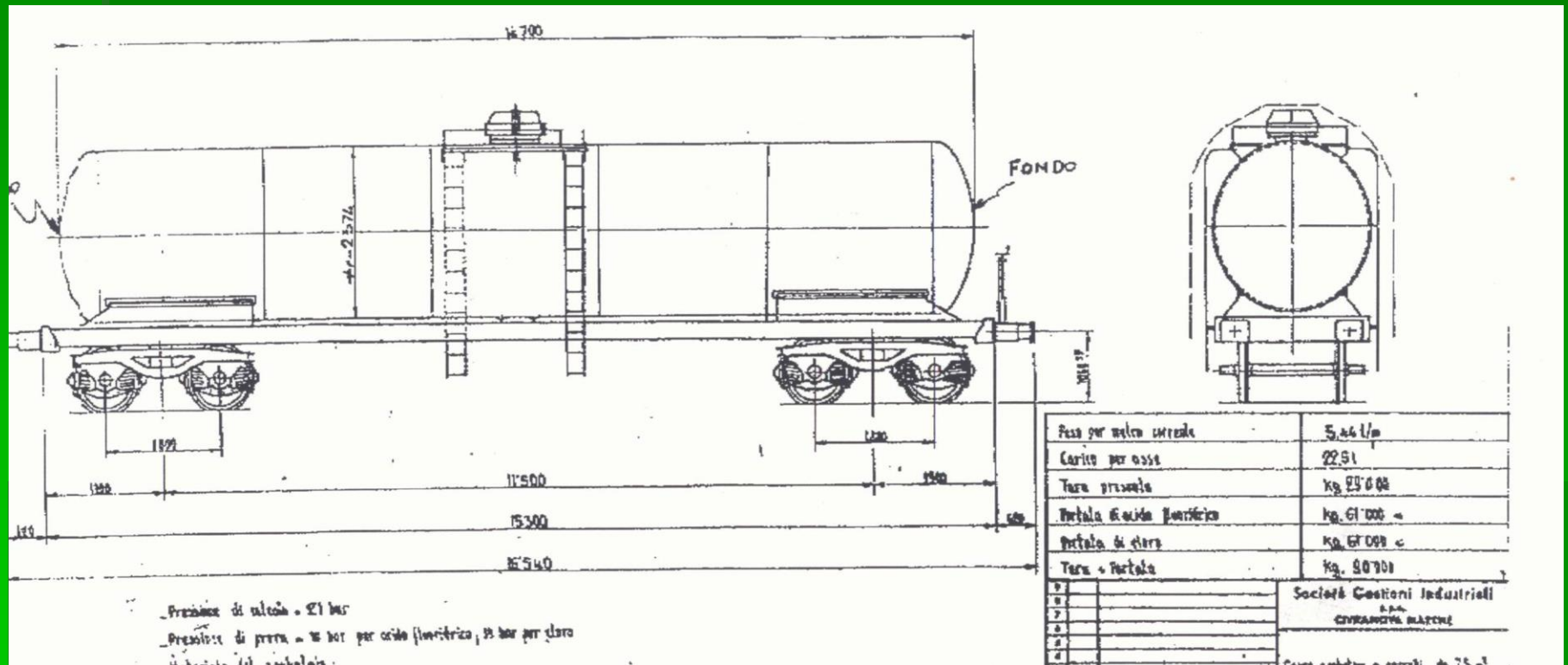


Ciclo di prova completo

Deformazione vs Pressione



Il carro ferroviario





Preparazione della superficie



Tracciatura

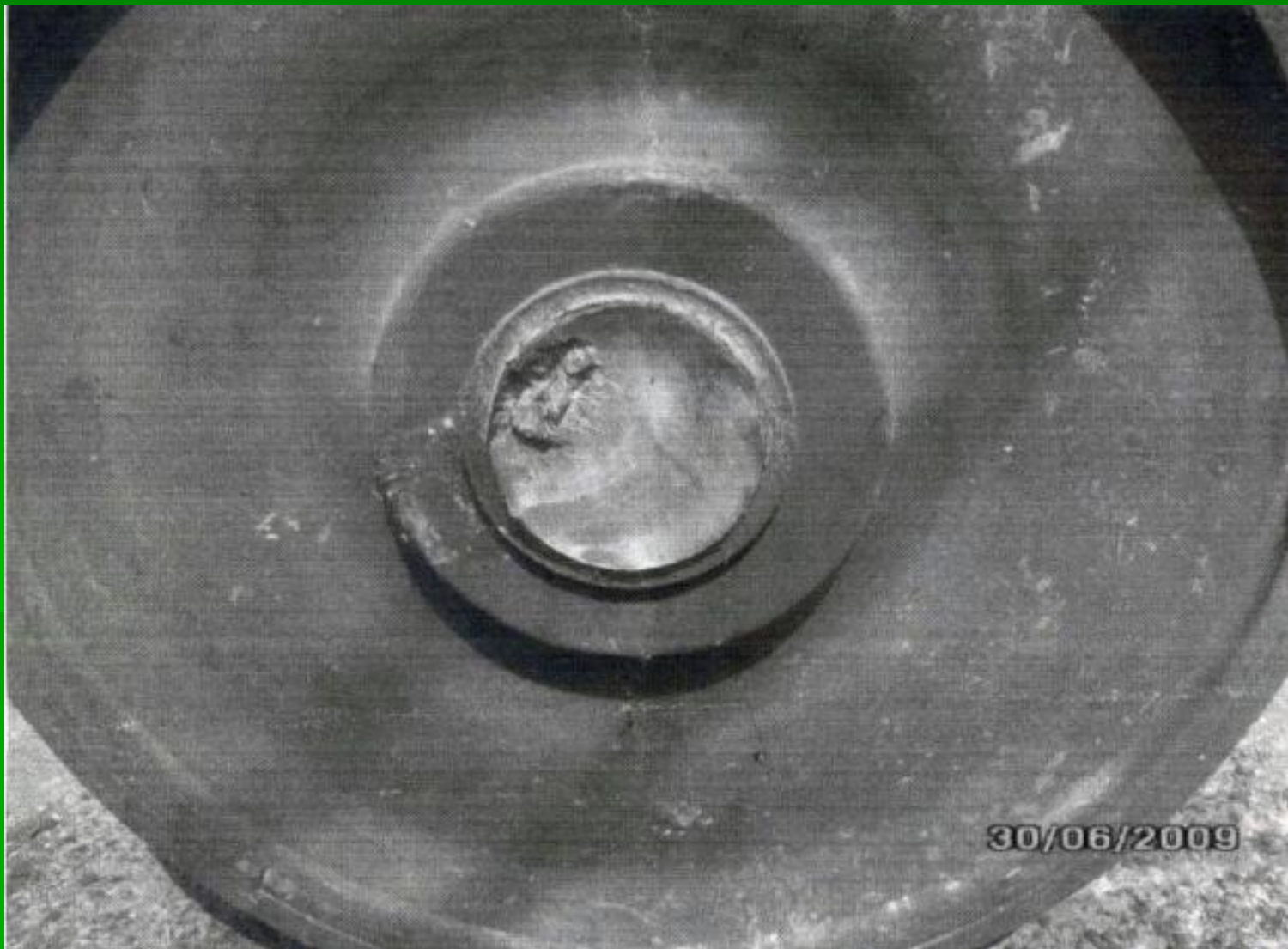


Incollaggio

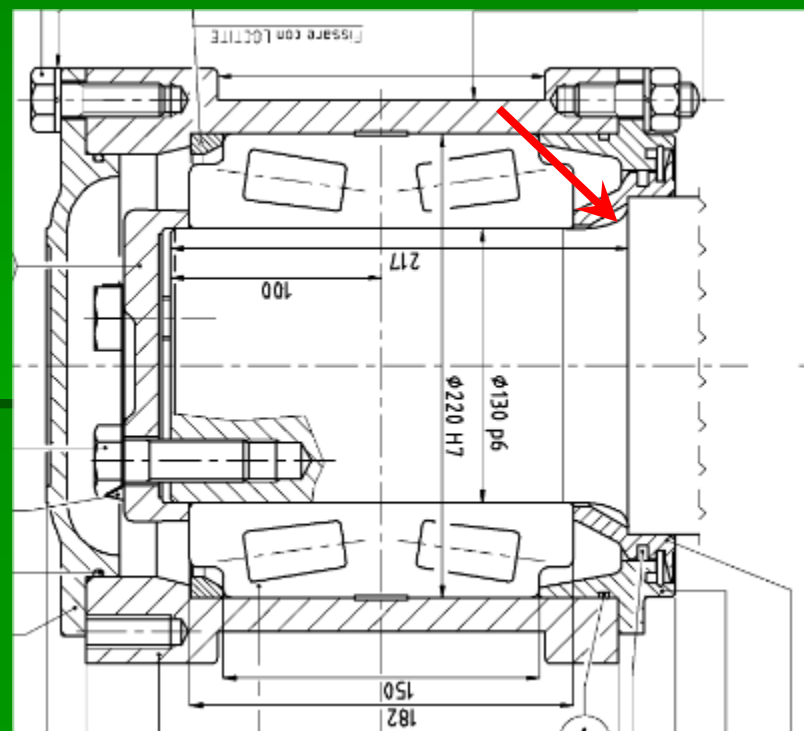
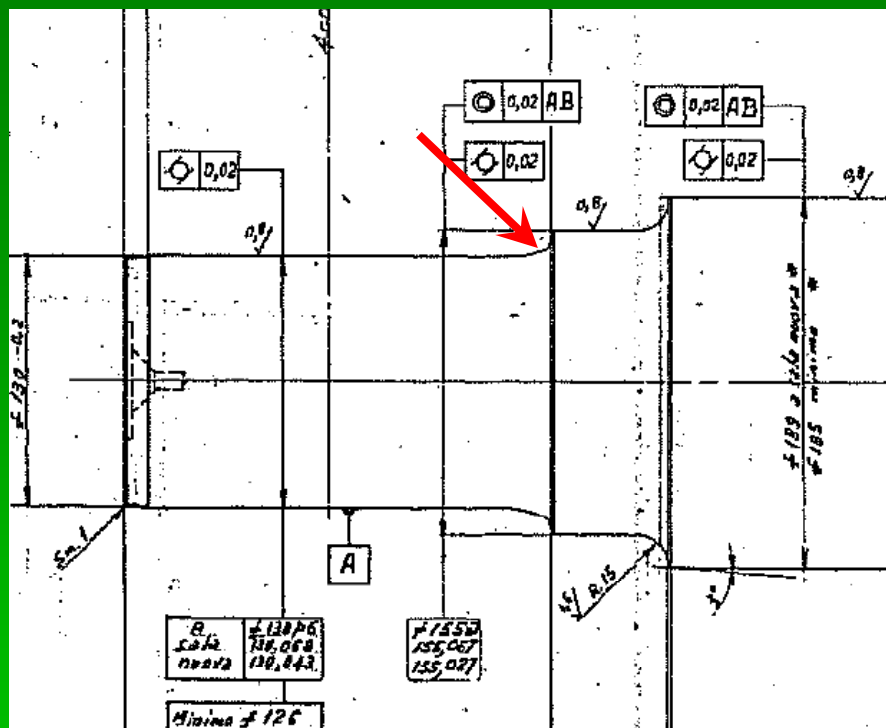




(Divagazione

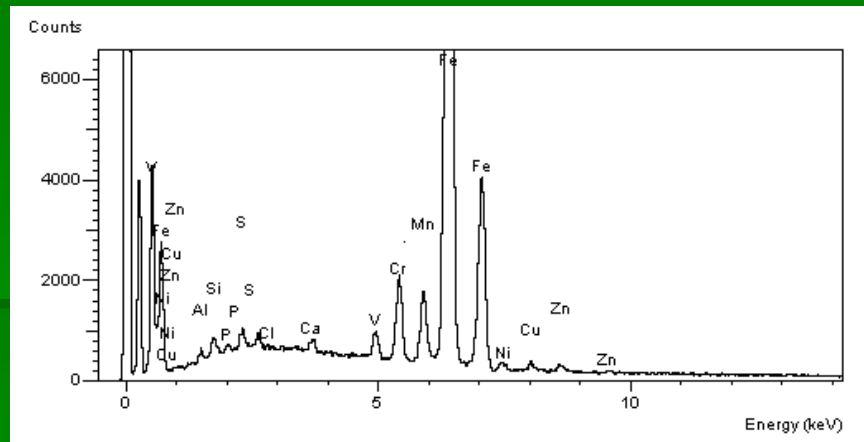
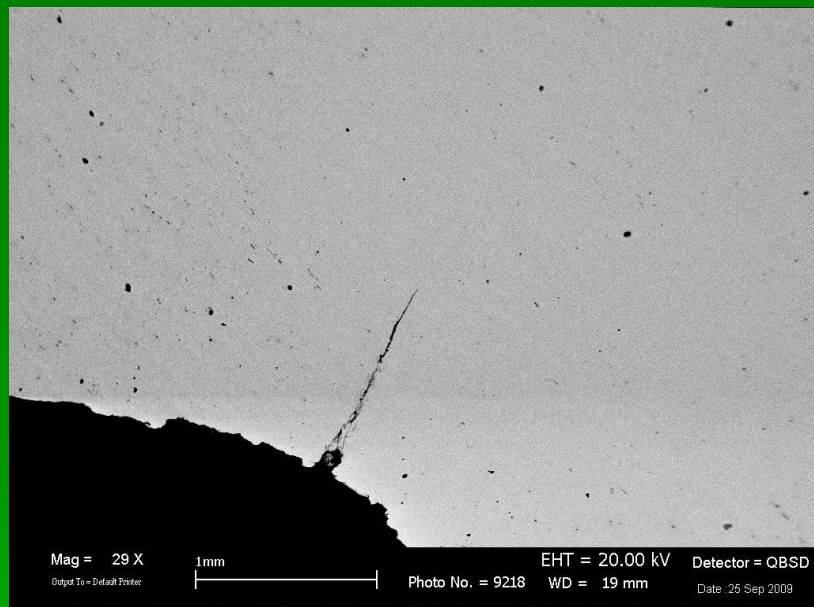


Divagazione

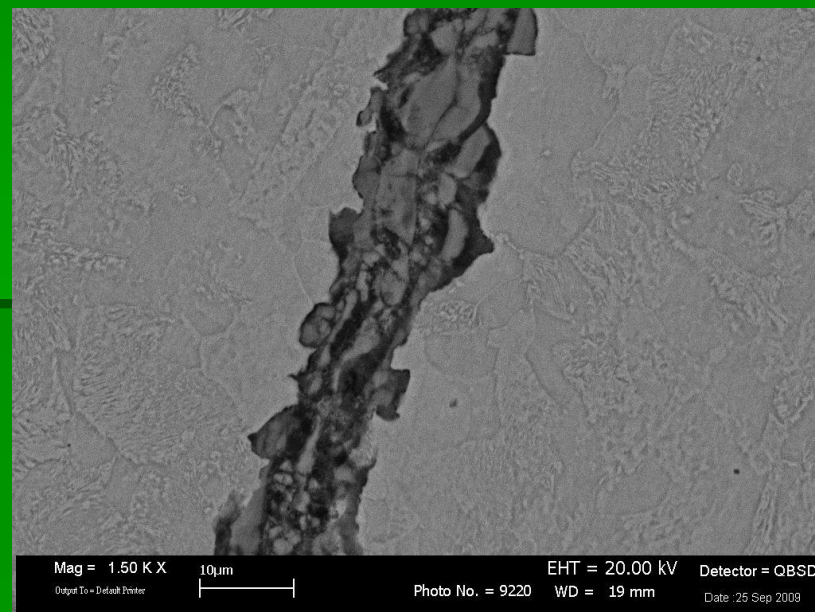
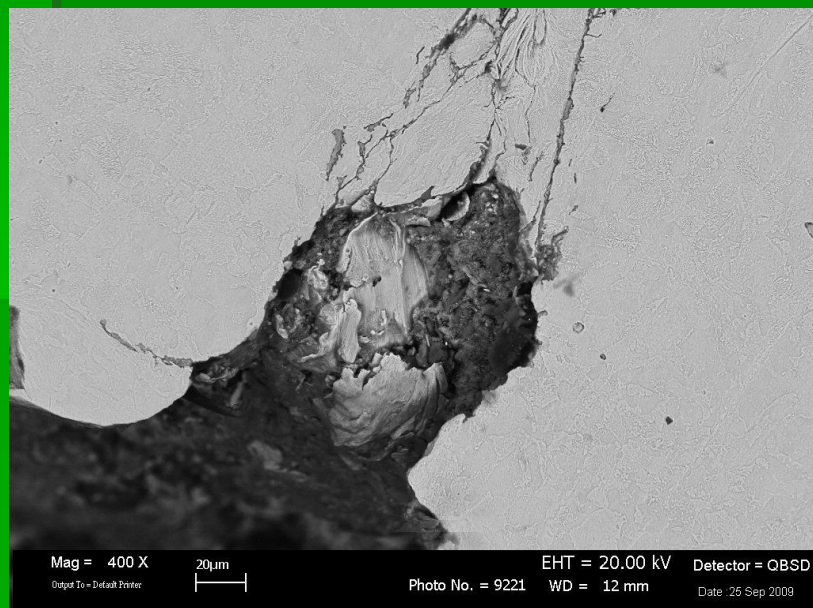


Divagazione





Divagazione)



L'ammortizzatore e la molla del freno







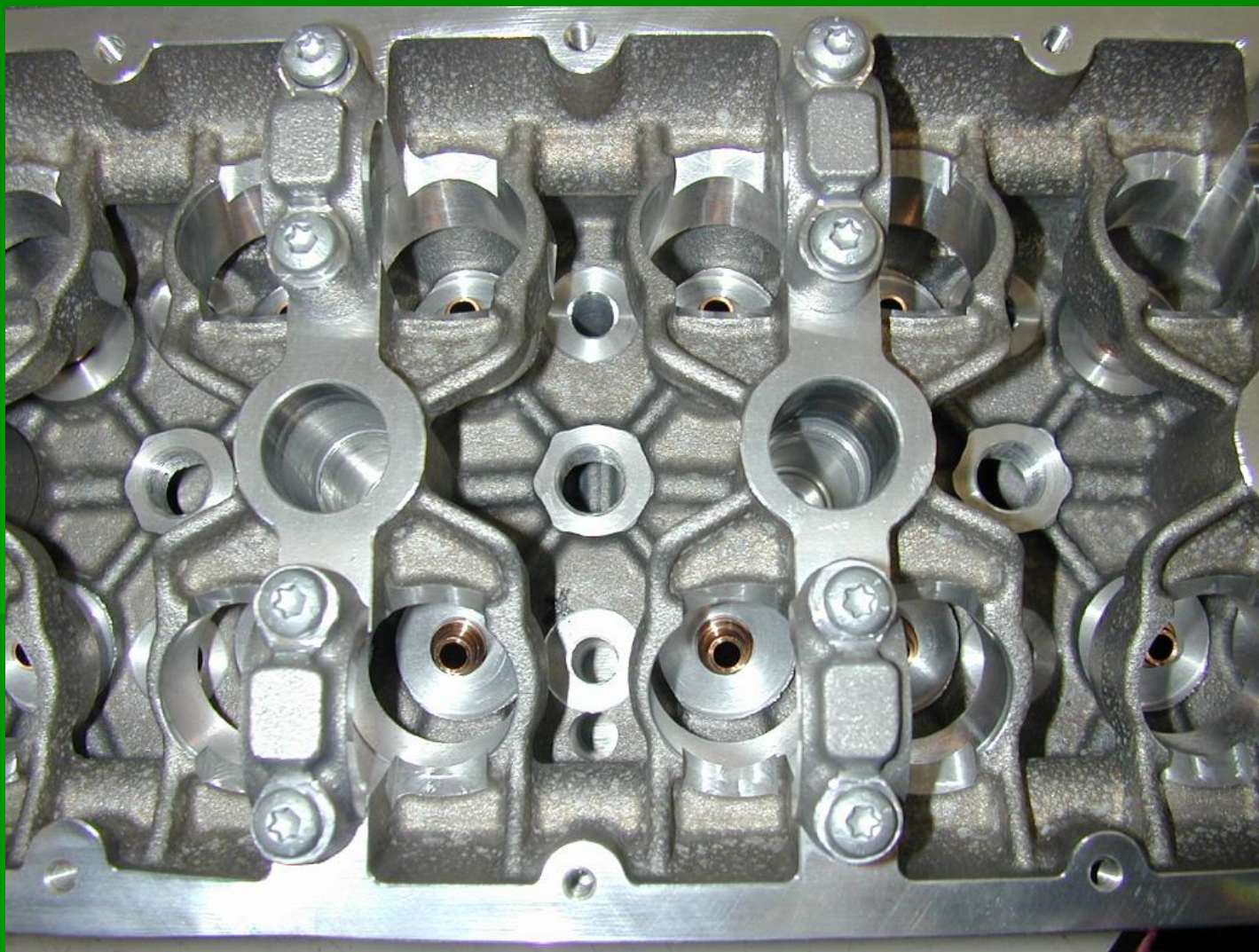




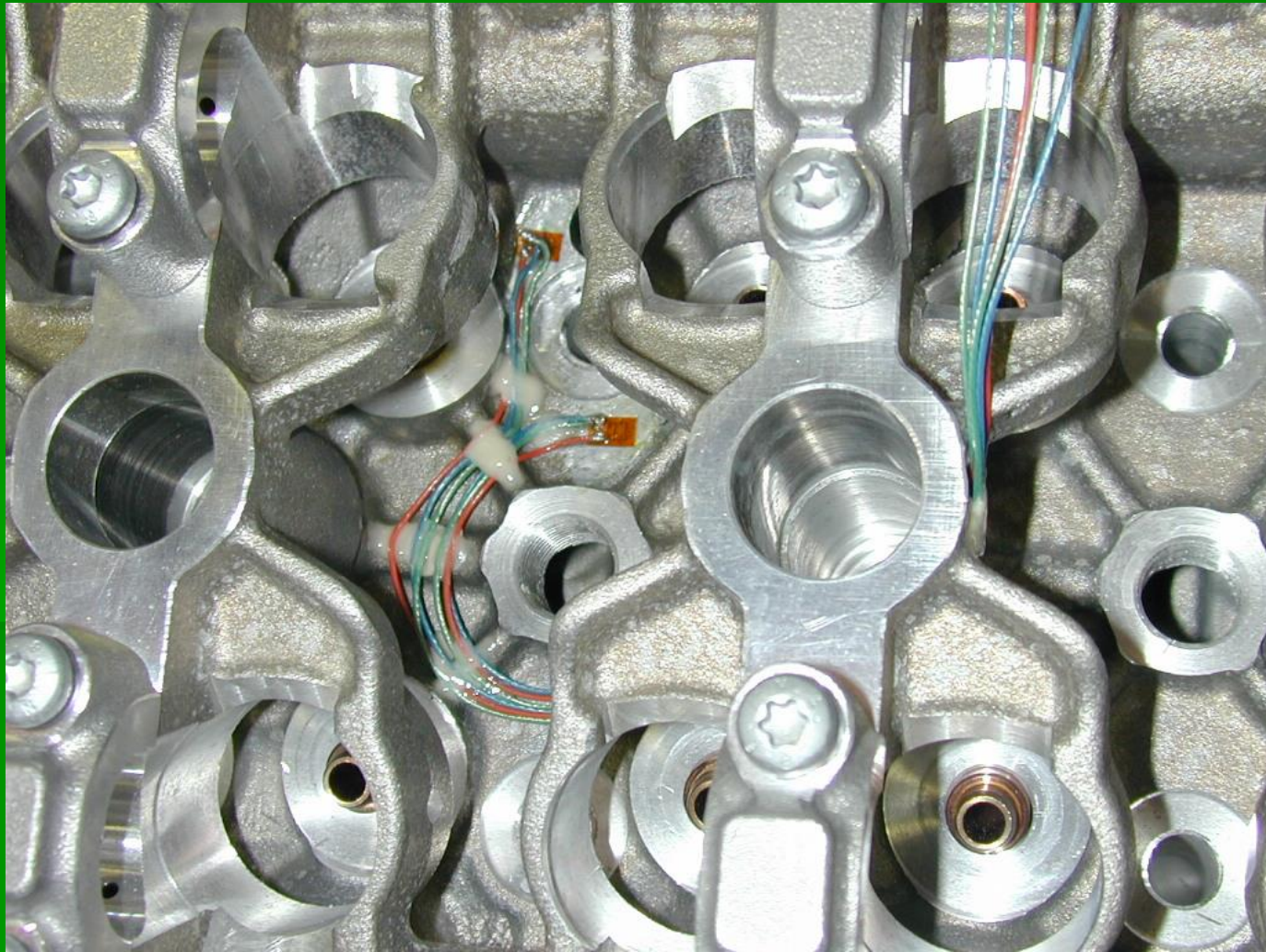
L'auto



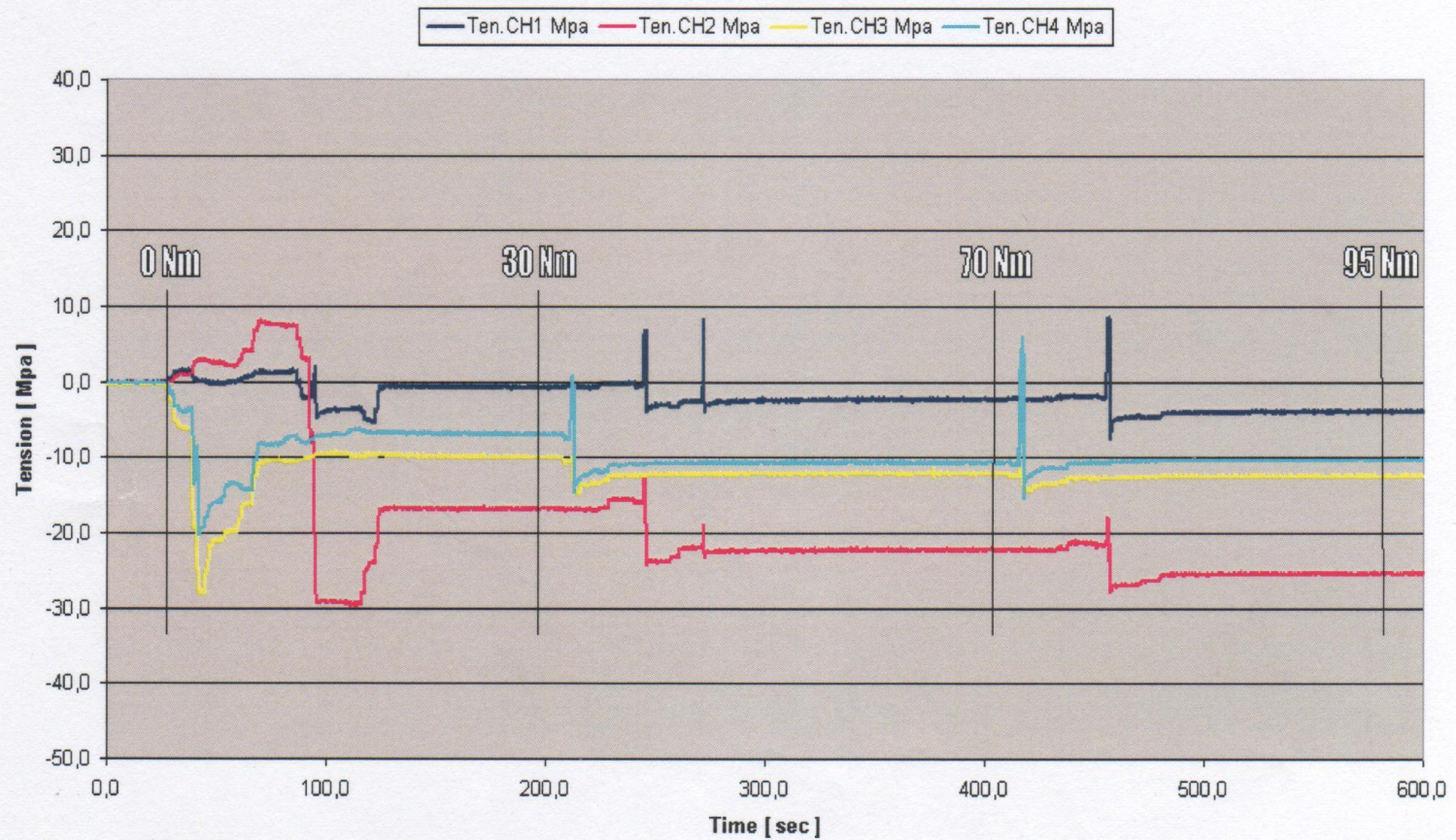


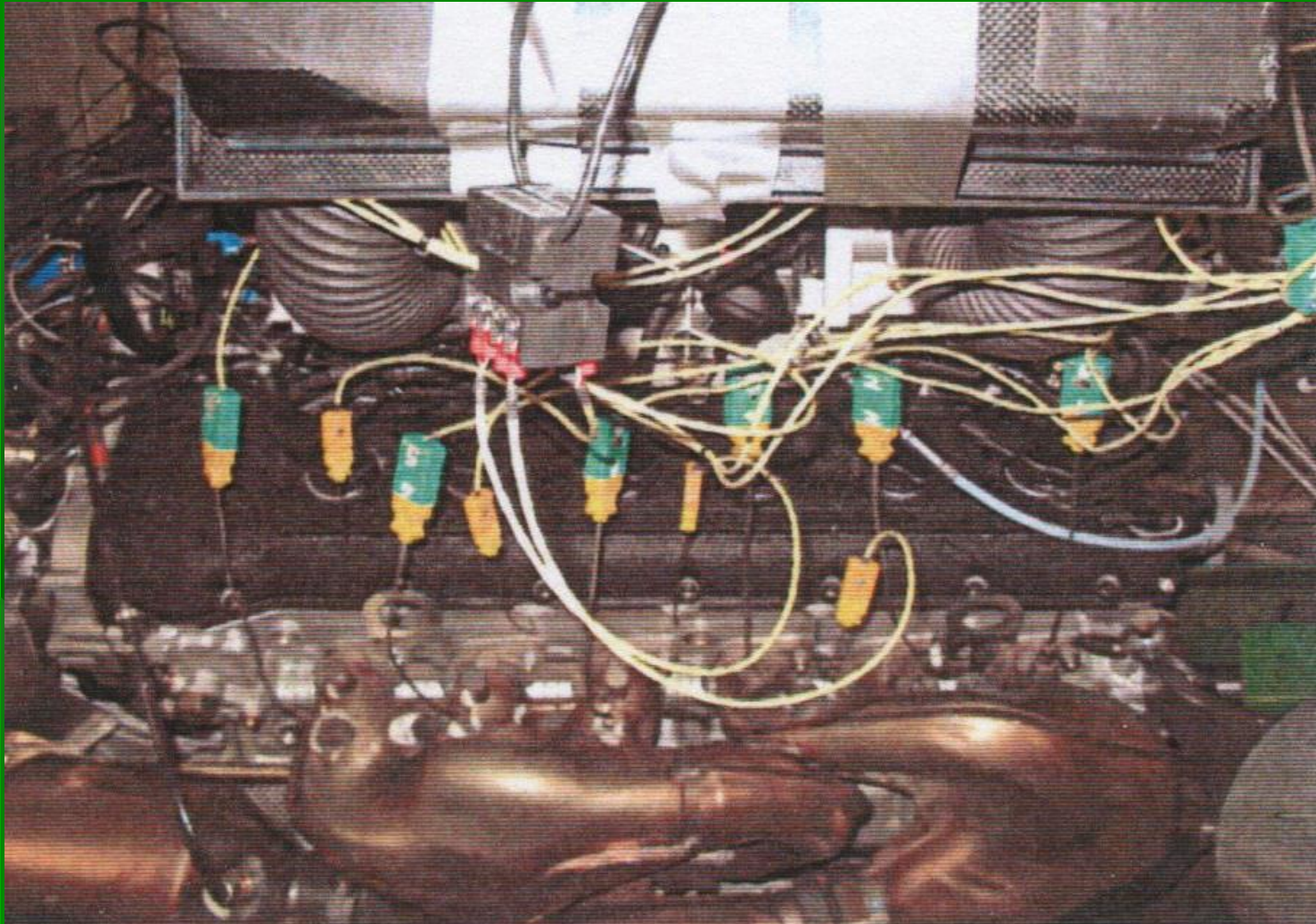




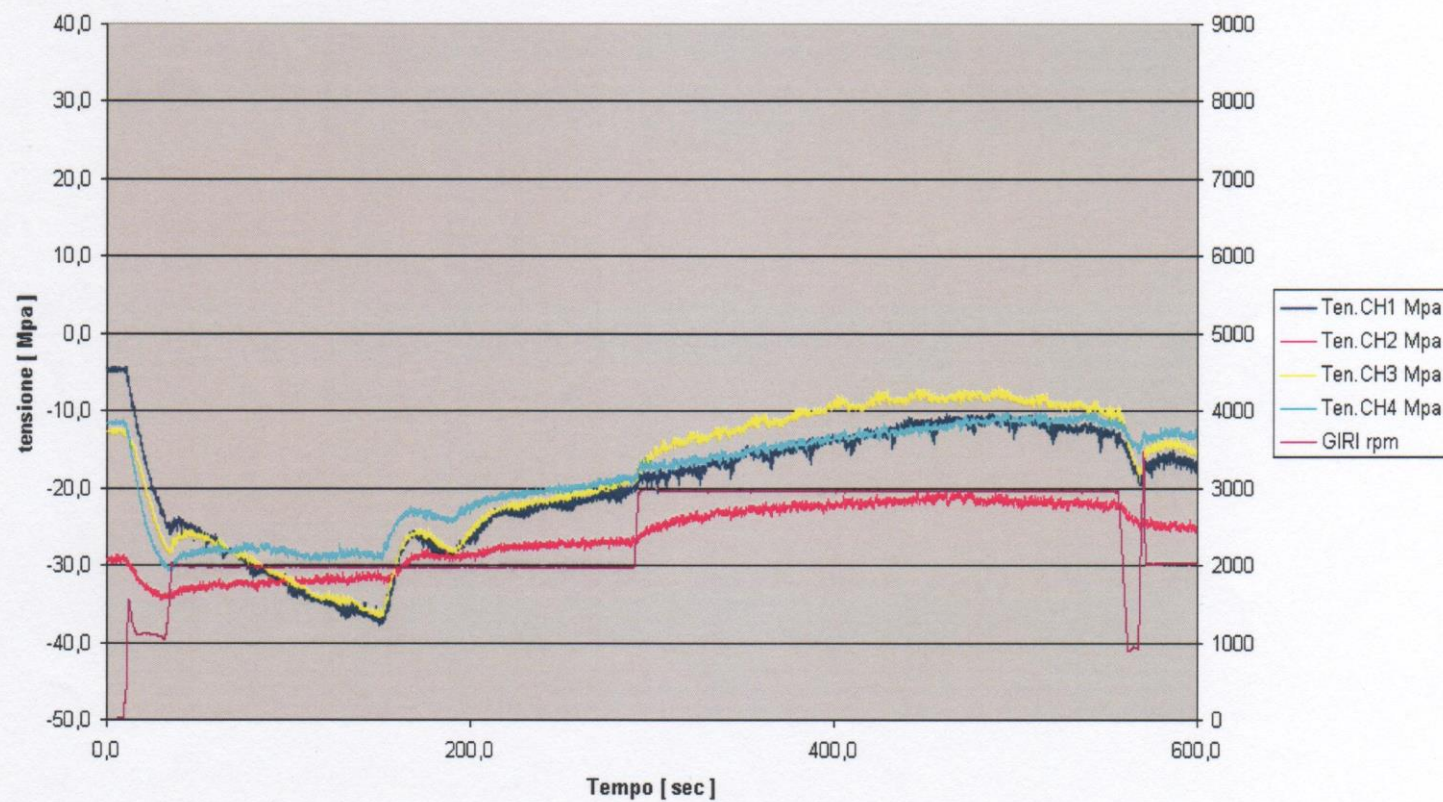


Static Tension - serraggio testa su motore 1° Step 30Nm / 2° Step 70Nm / 3° Step 95Nm

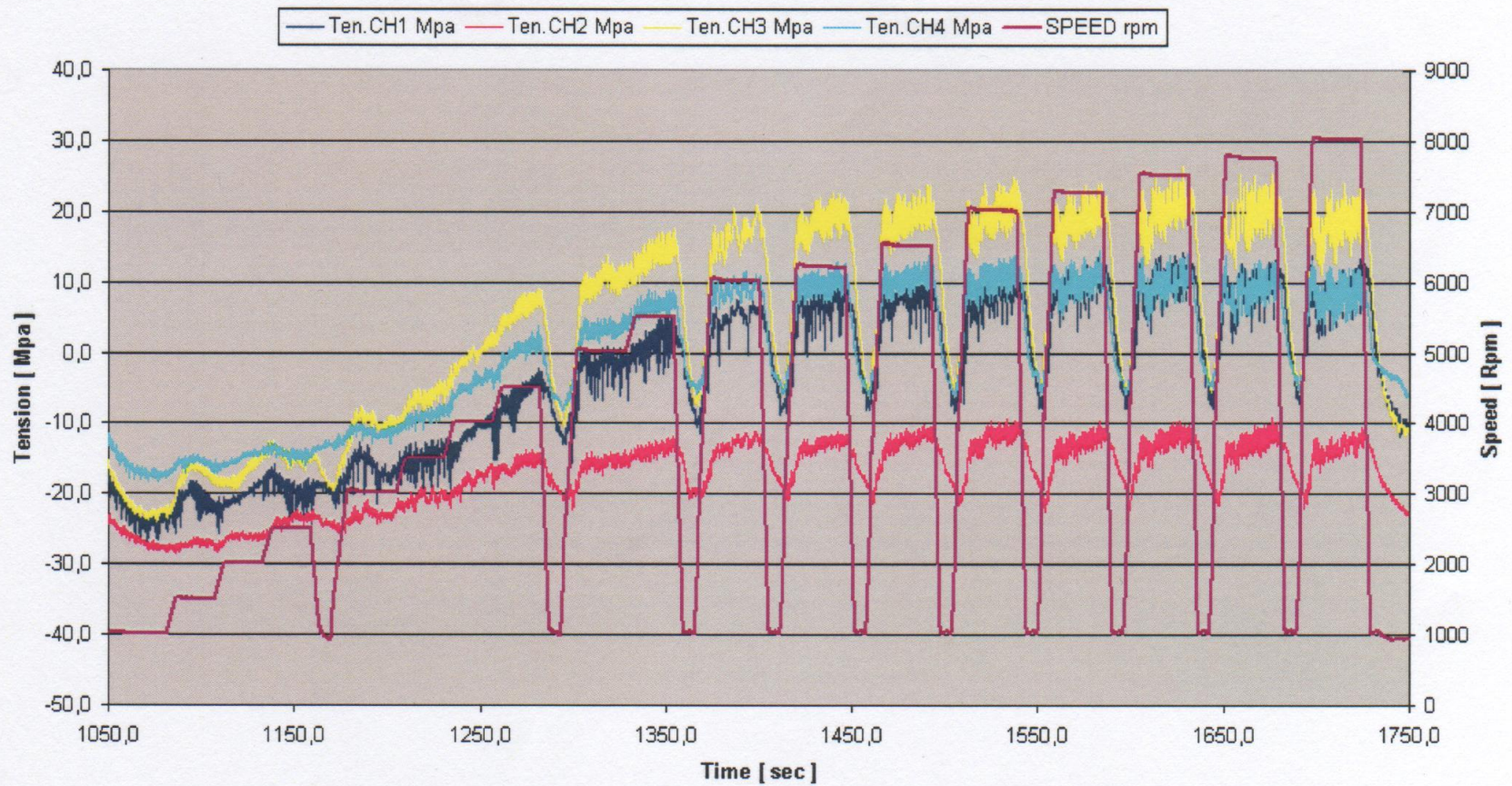




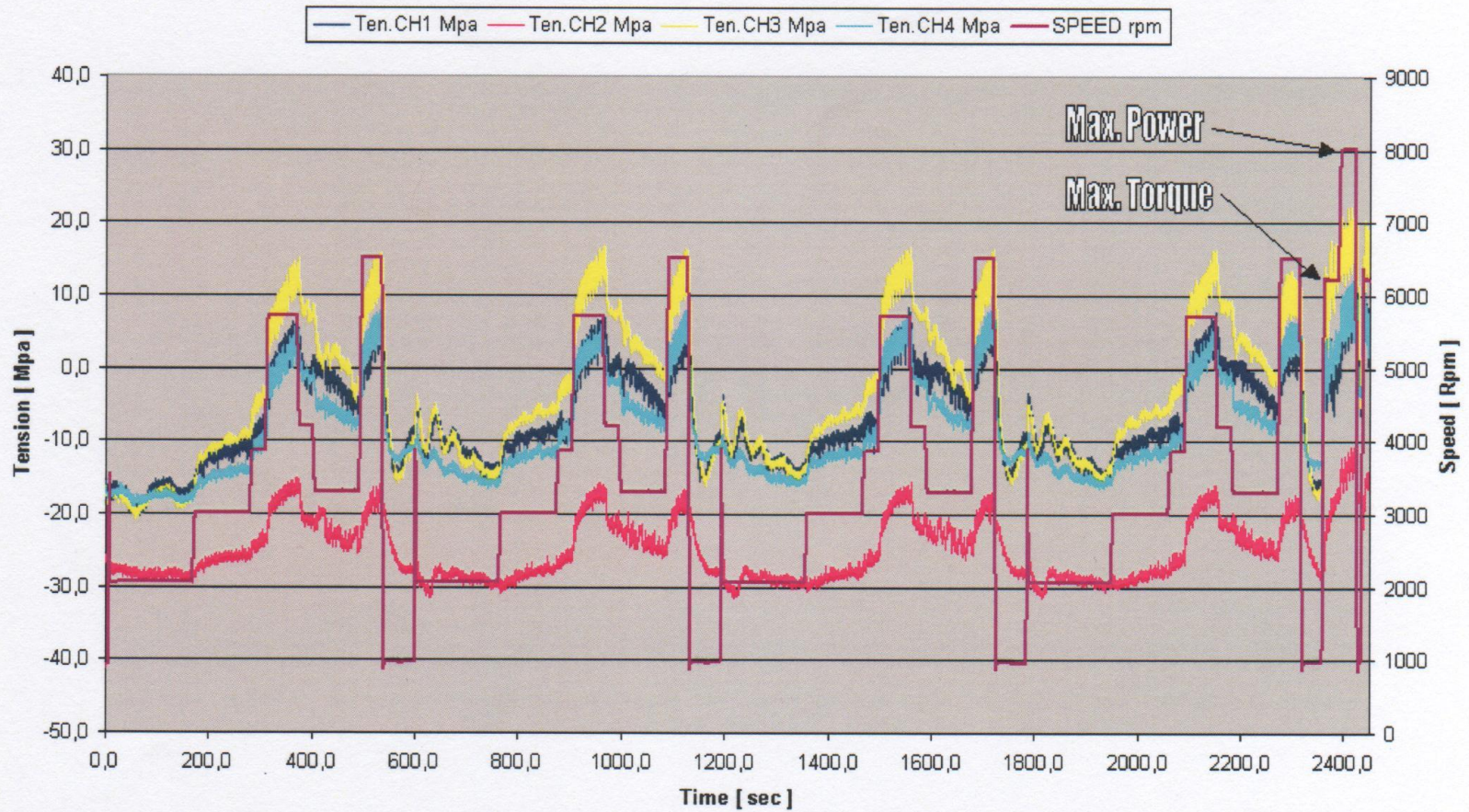
Tensione dinamica - Durata - dettaglio fase di riscaldamento - inizio acquisizione motore freddo
sample 10Hz



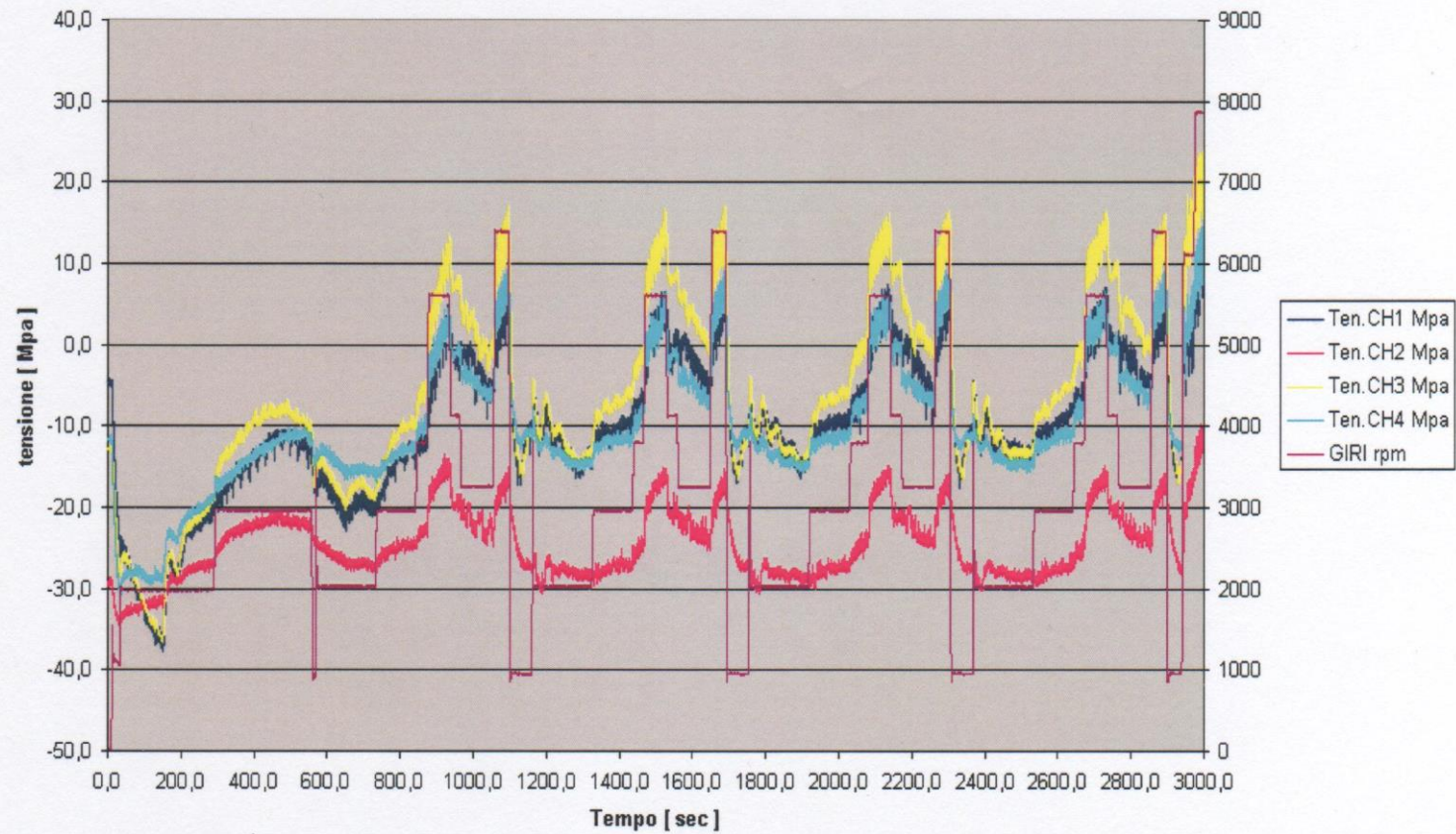
Performance Test - A_1938_003_02_03_P_03 - L537 n° 1938



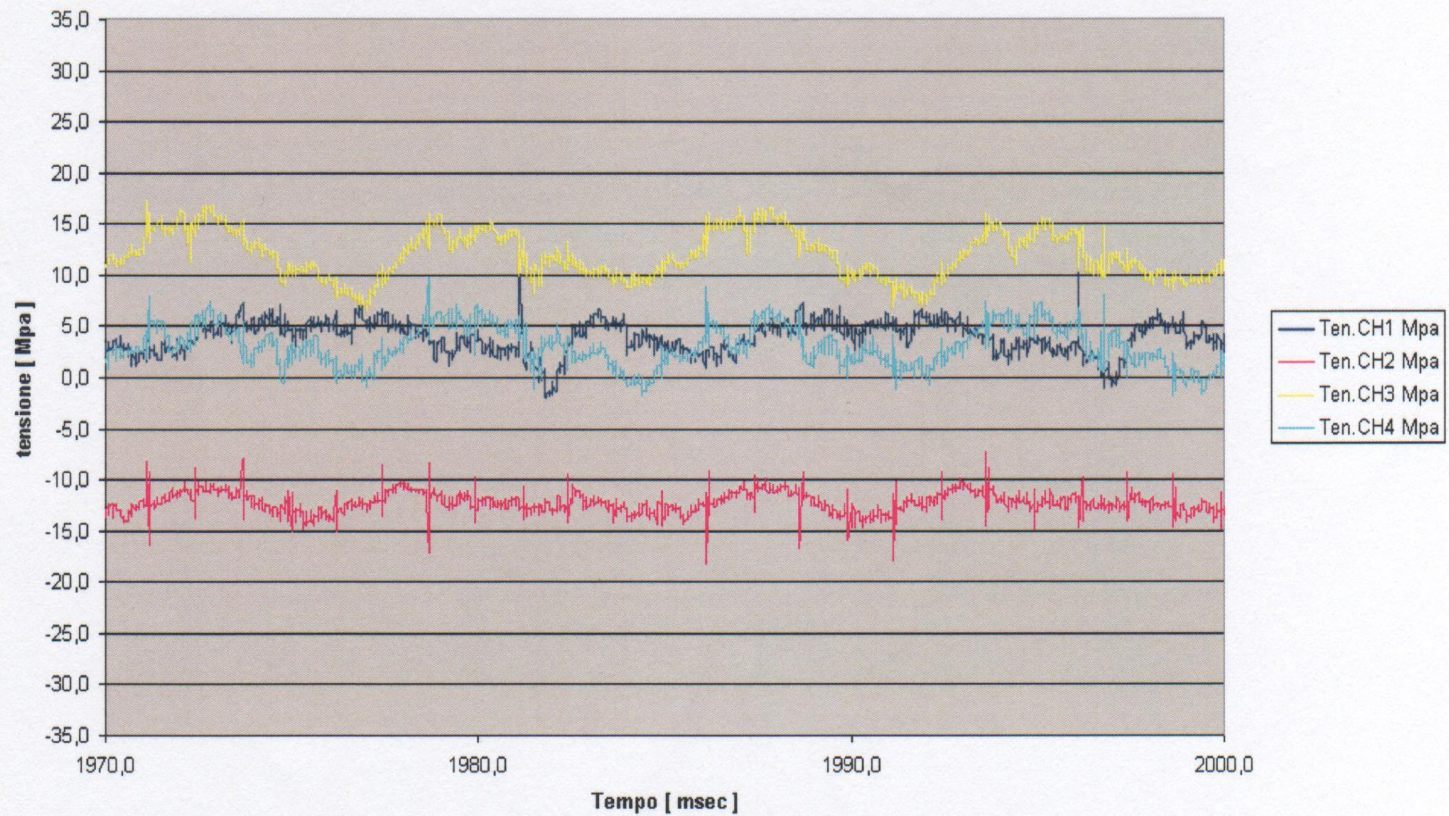
Test Durability - A_1938_001_03_D_03 - L537 n° 1938



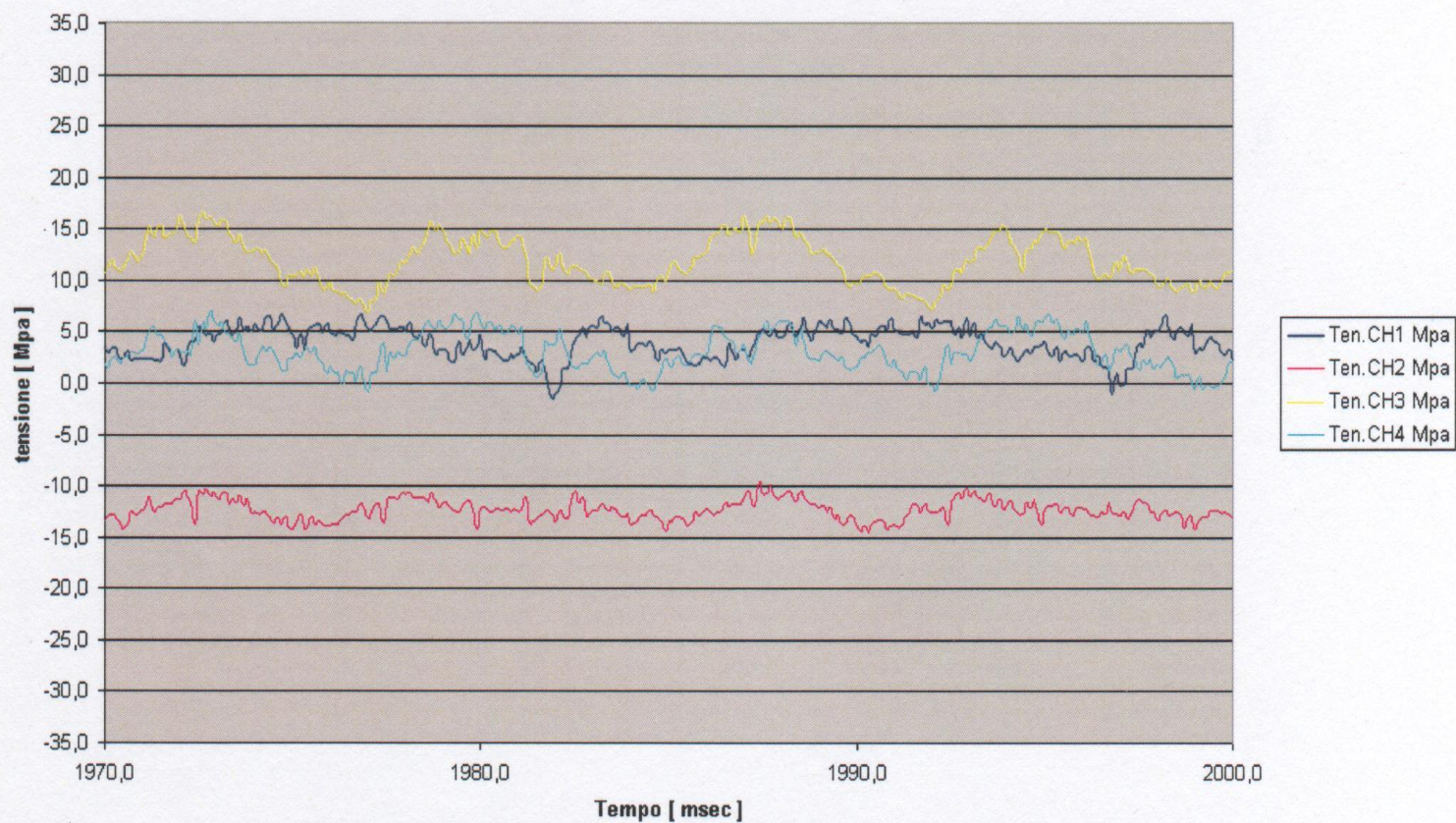
Tensione dinamica - Durata - 1 ciclo con fase di riscaldamento - sample 10Hz



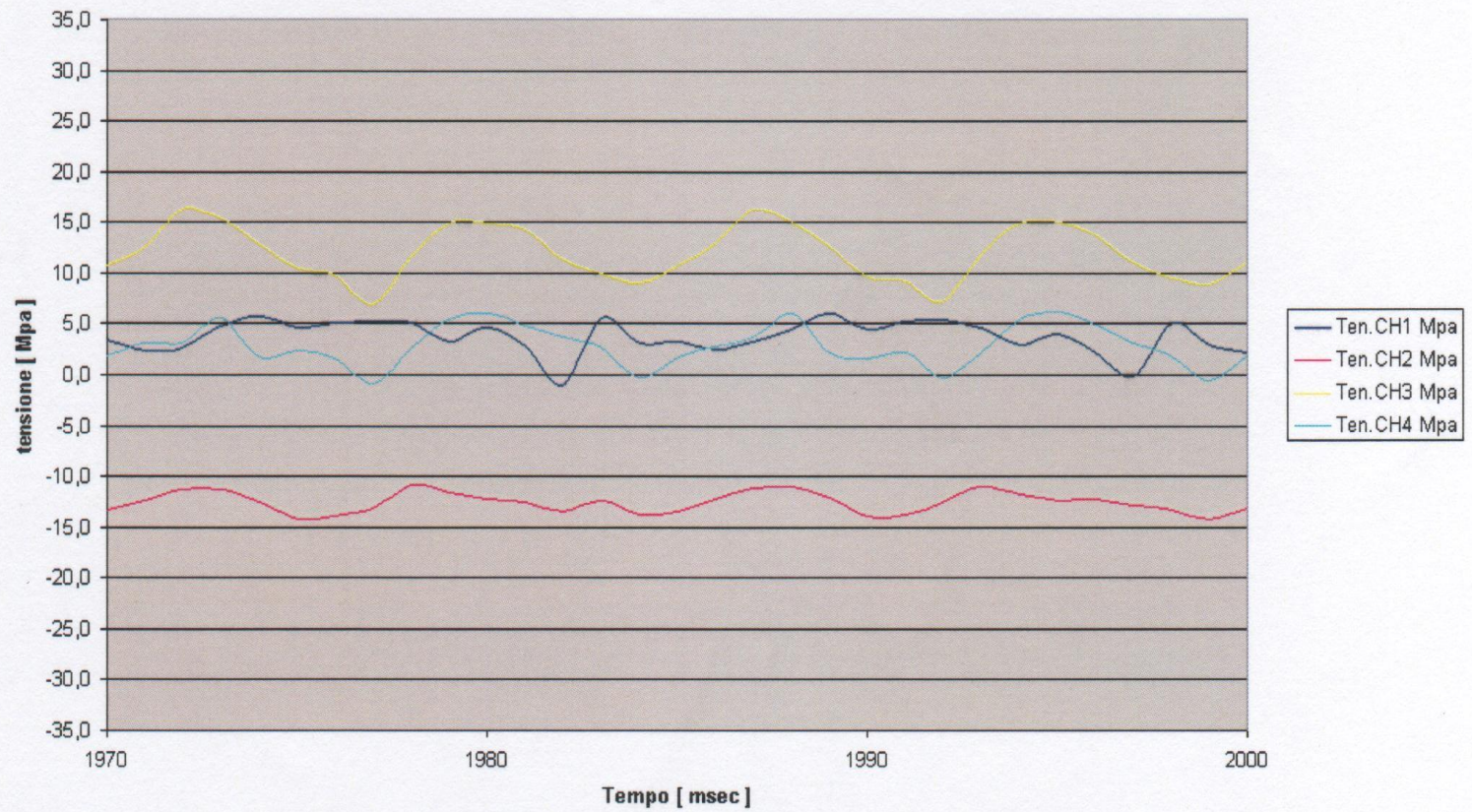
Tensione dinamica - Curva di potenza 1 ciclo 100khz - 8000 rpm



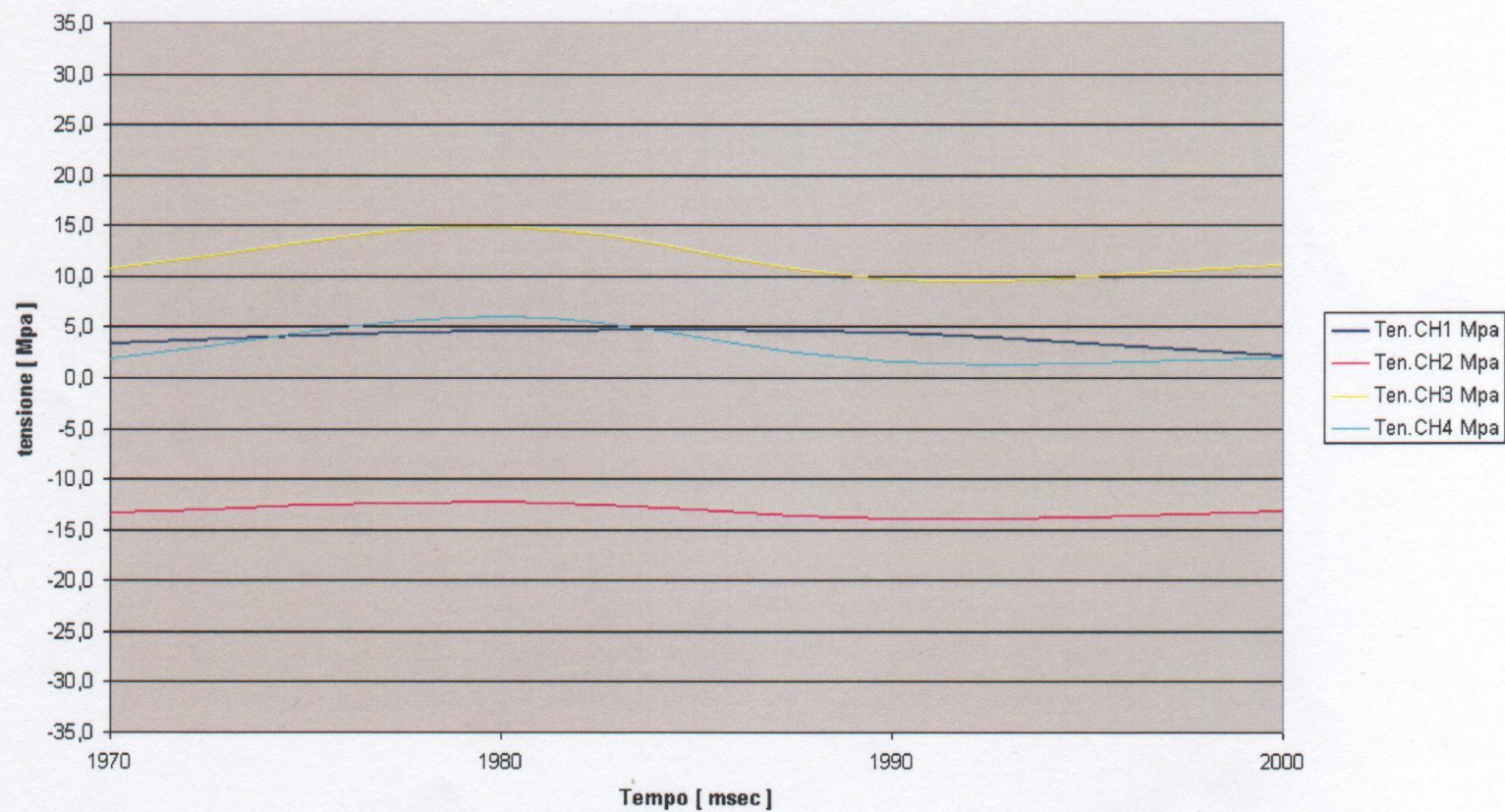
Tensione dinamica - Curva di potenza 1 ciclo 10kHz - 8000 rpm

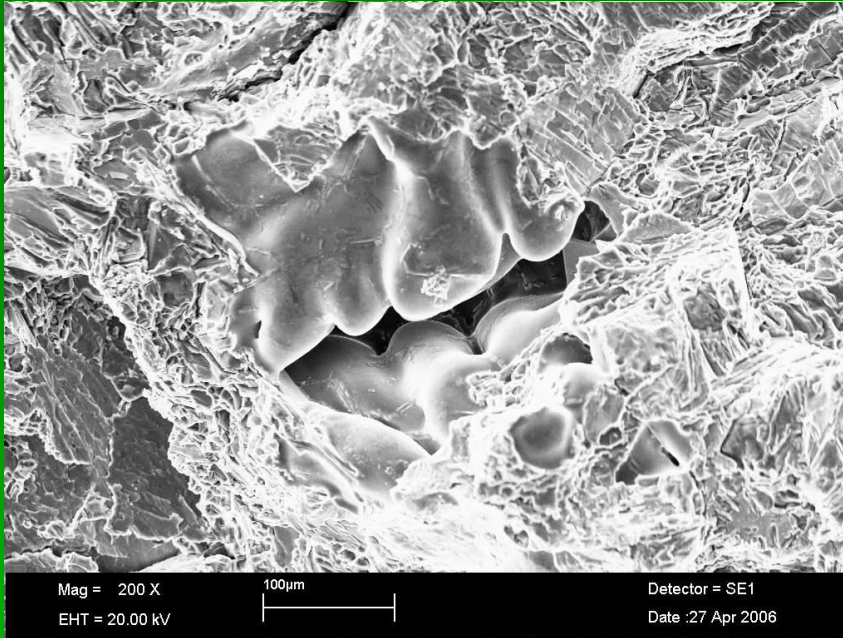


Tensione dinamica - Curva di potenza 1 ciclo 1kHz - 8000 rpm

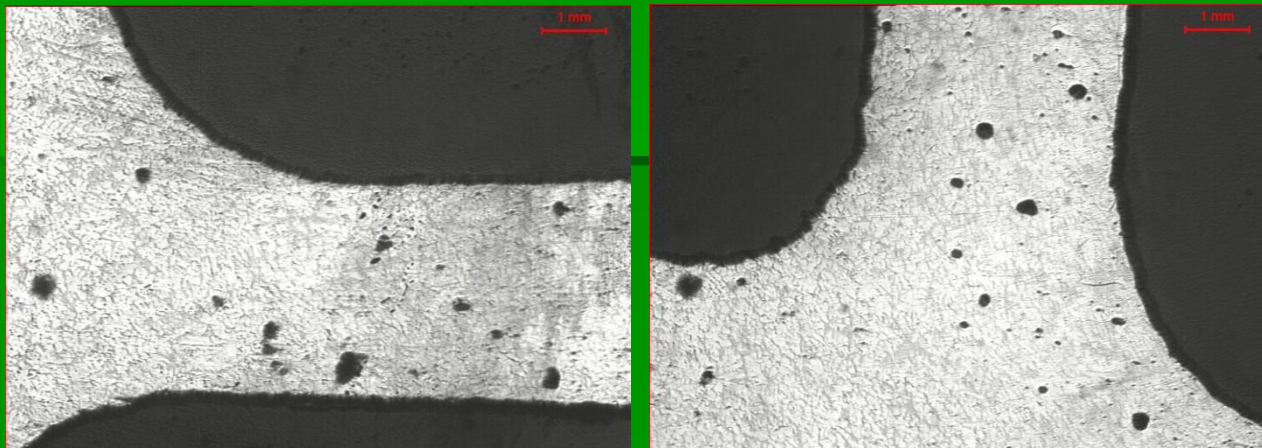


Tensione dinamica - Curva di potenza 1 ciclo 100Hz - 8000 rpm






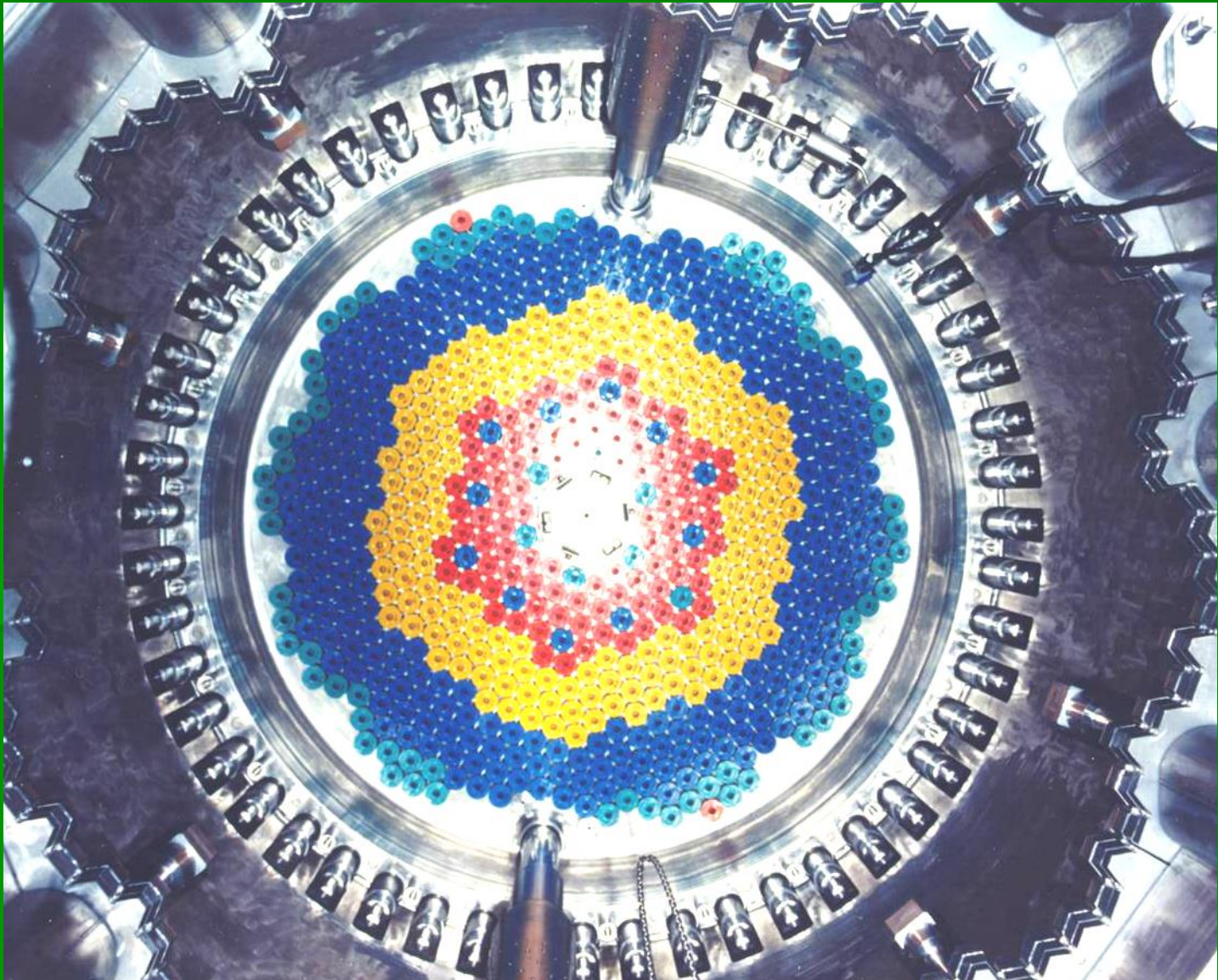
Porosità interdendritiche
da fusione

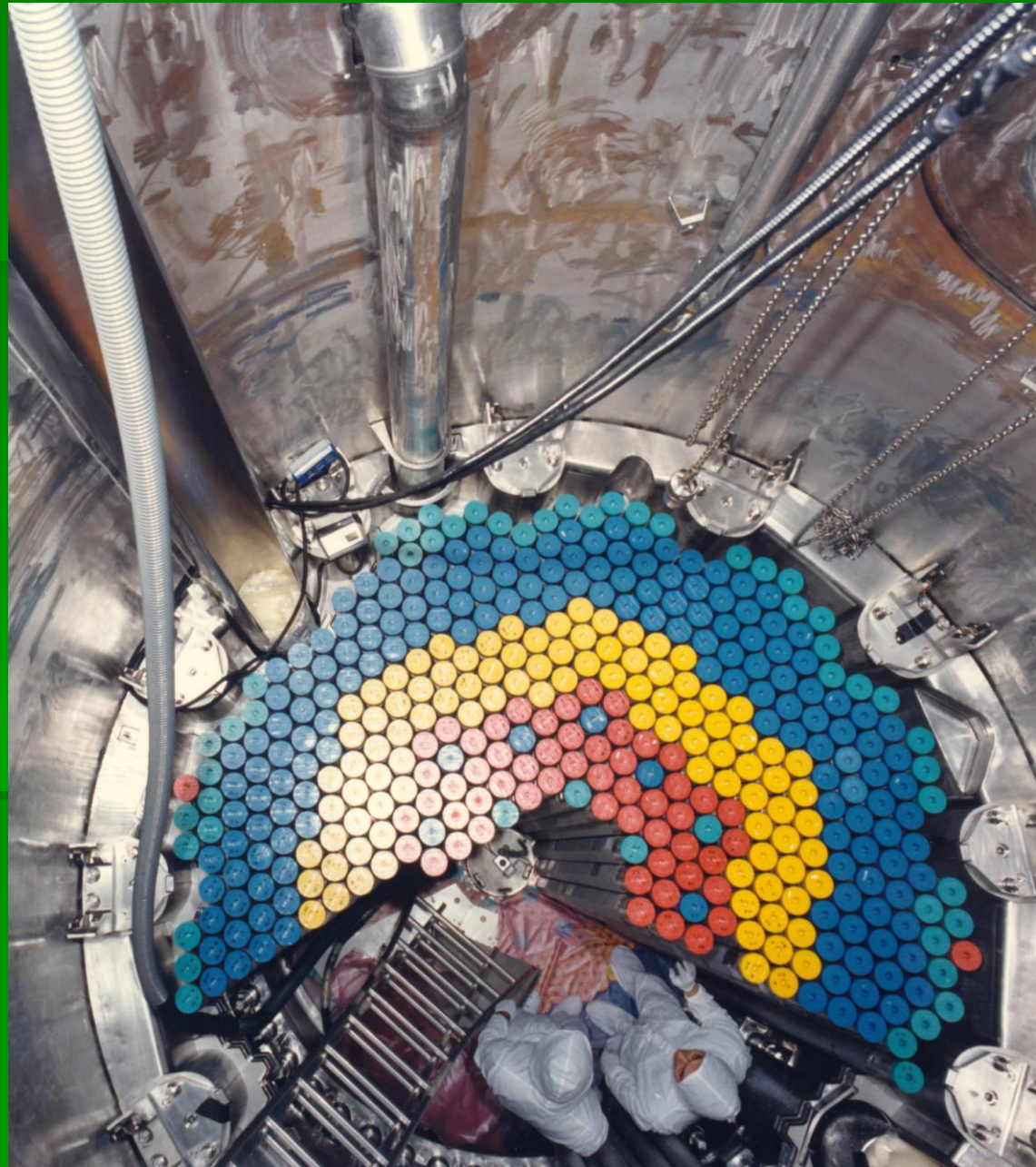


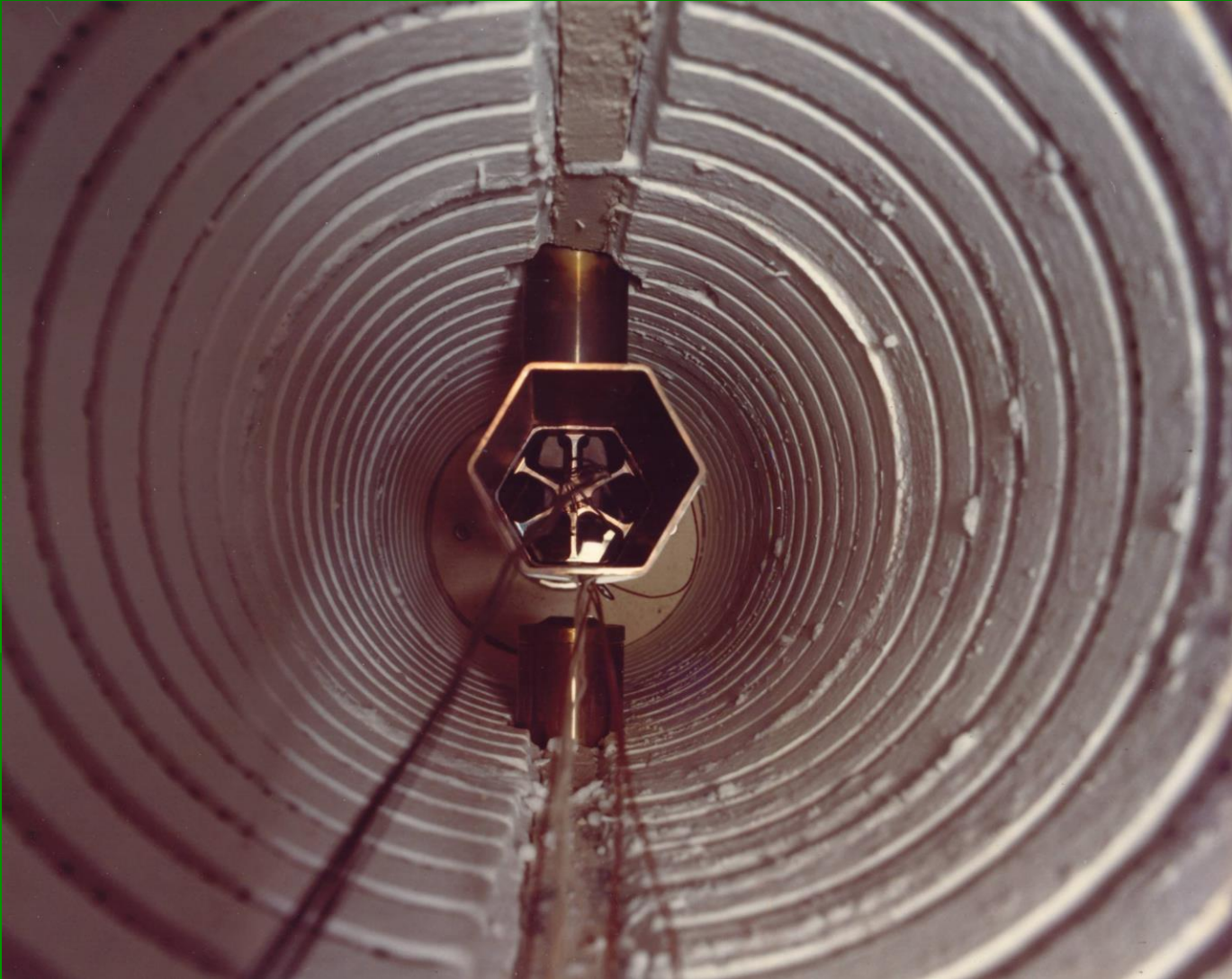
struttura del materiale

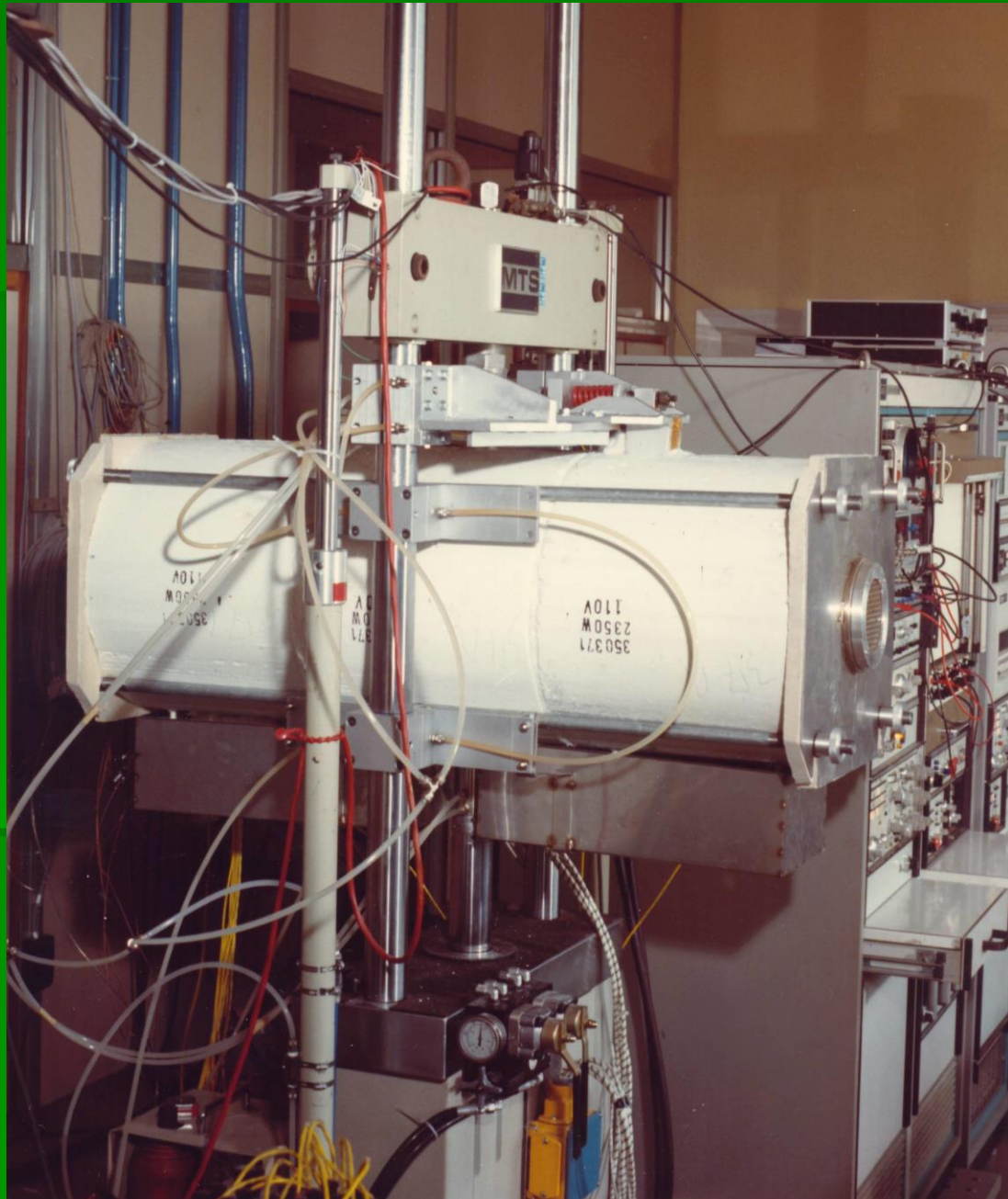


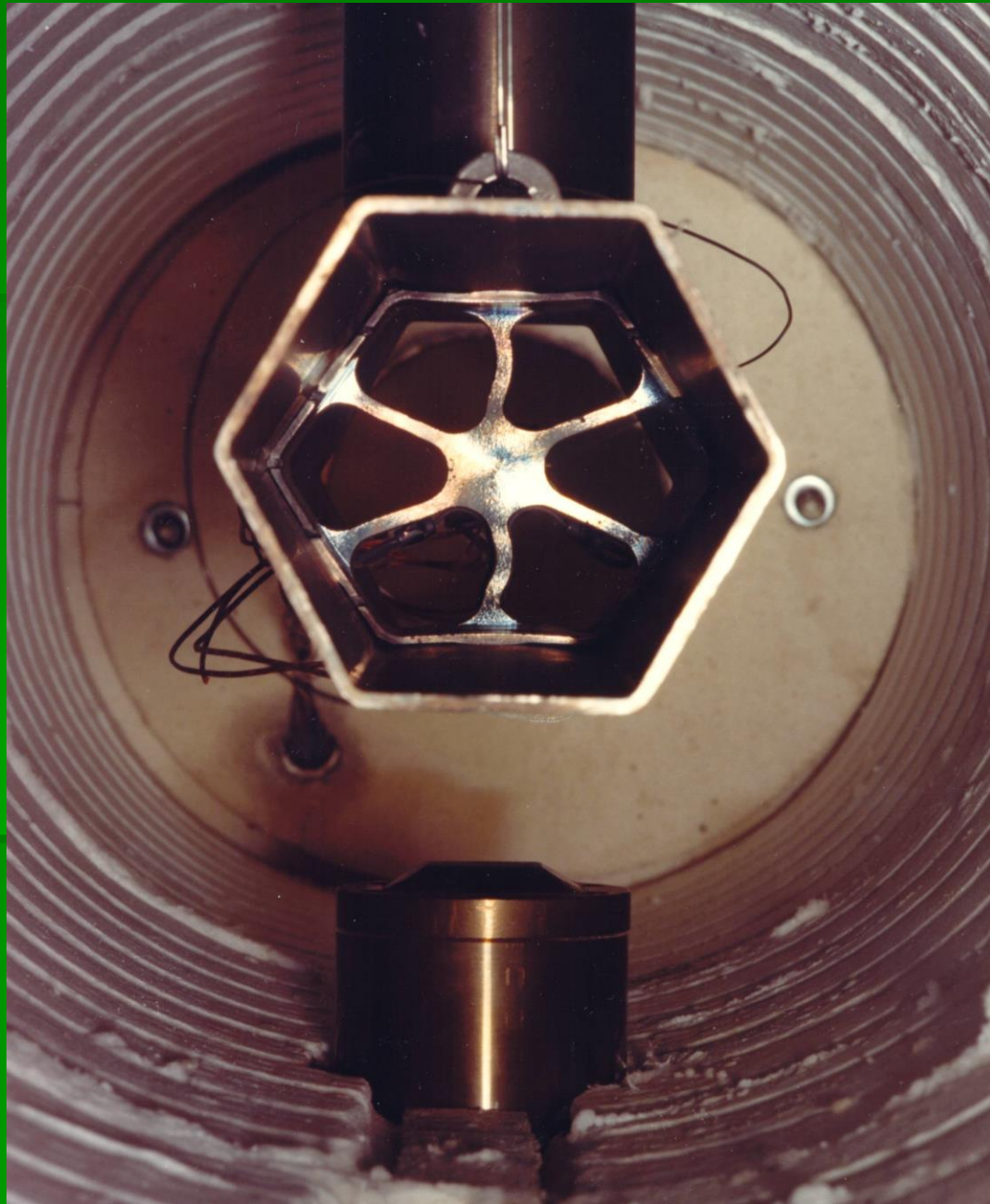
I rinominabili (?) impianti nucleari

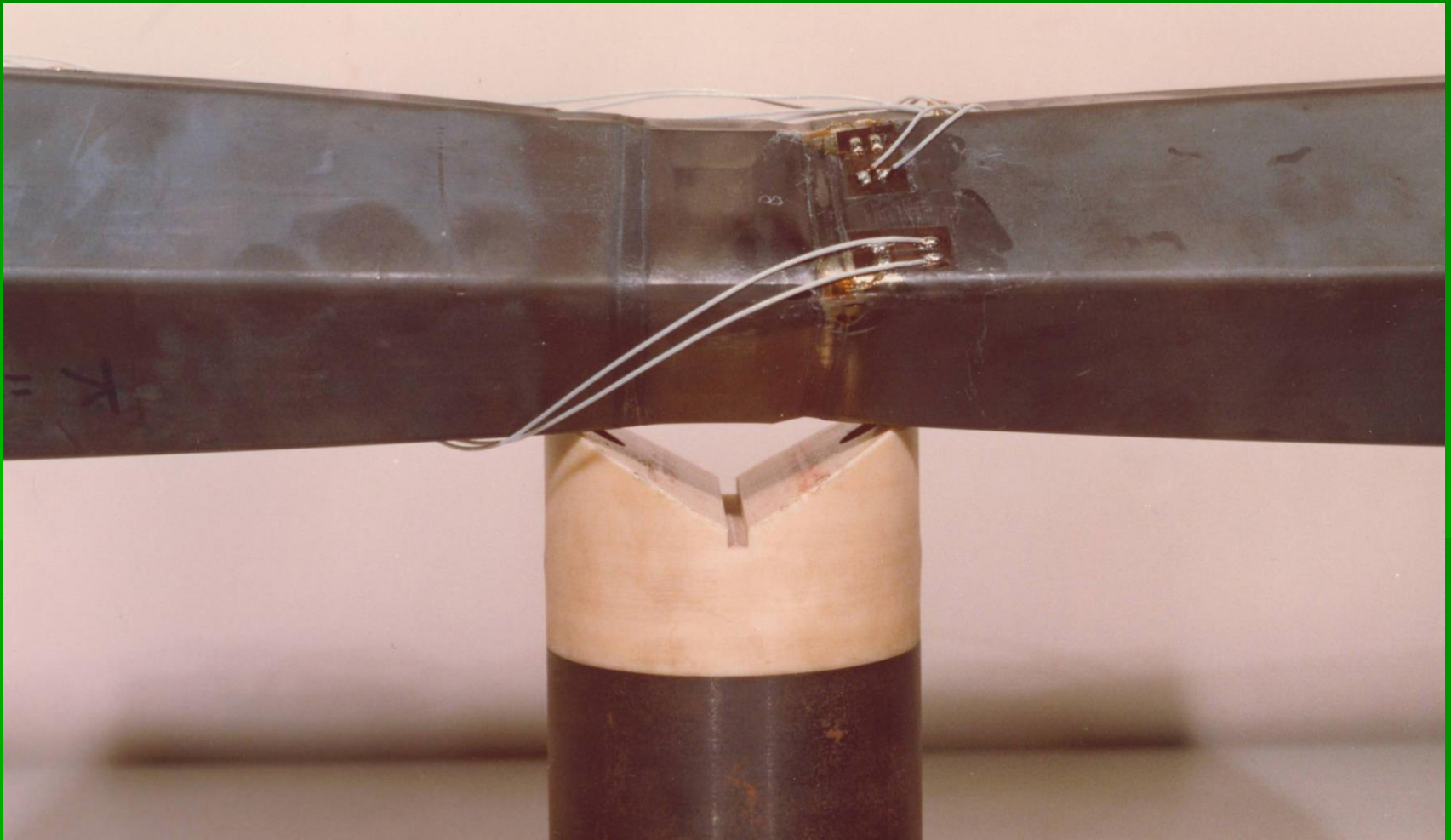


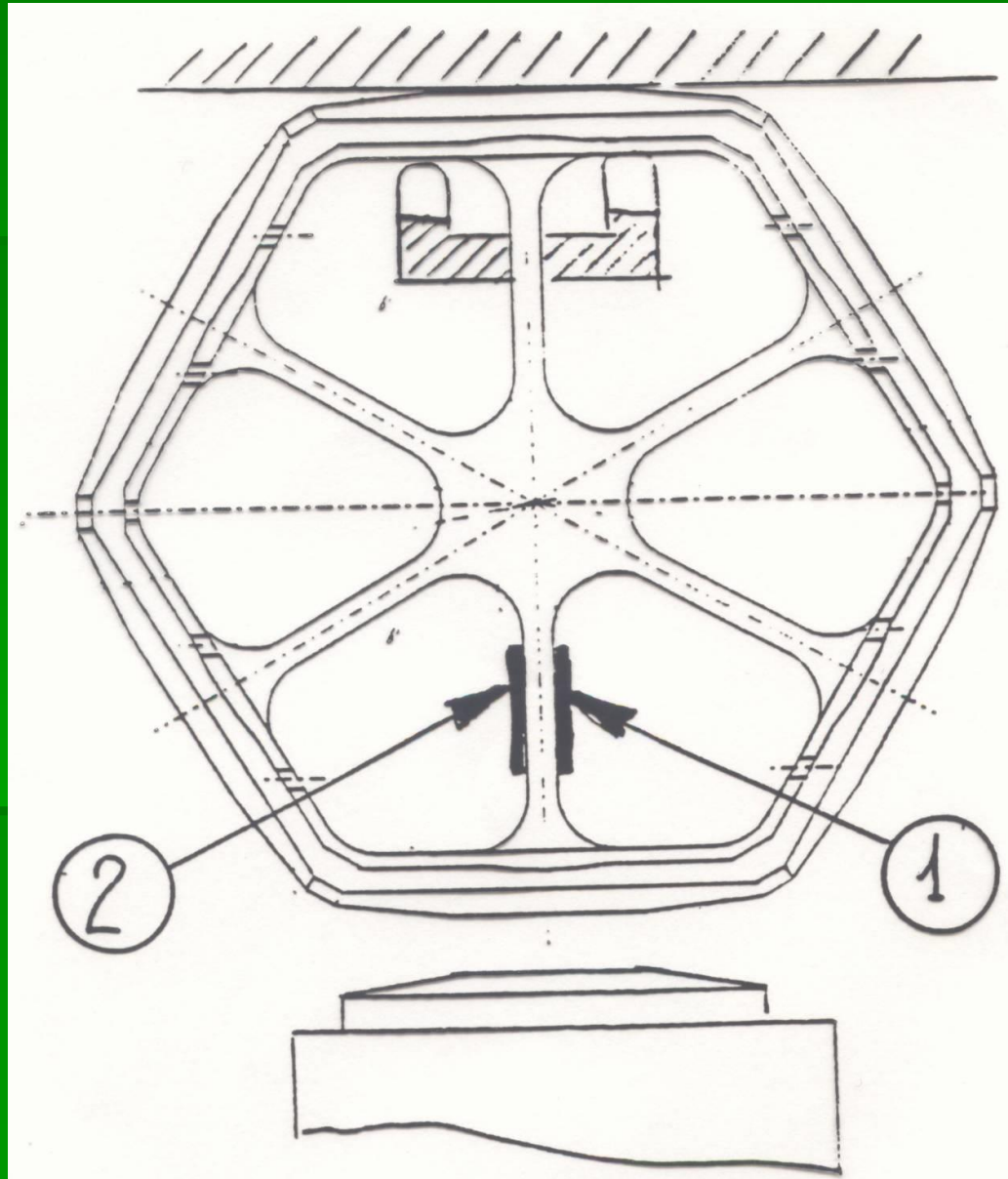




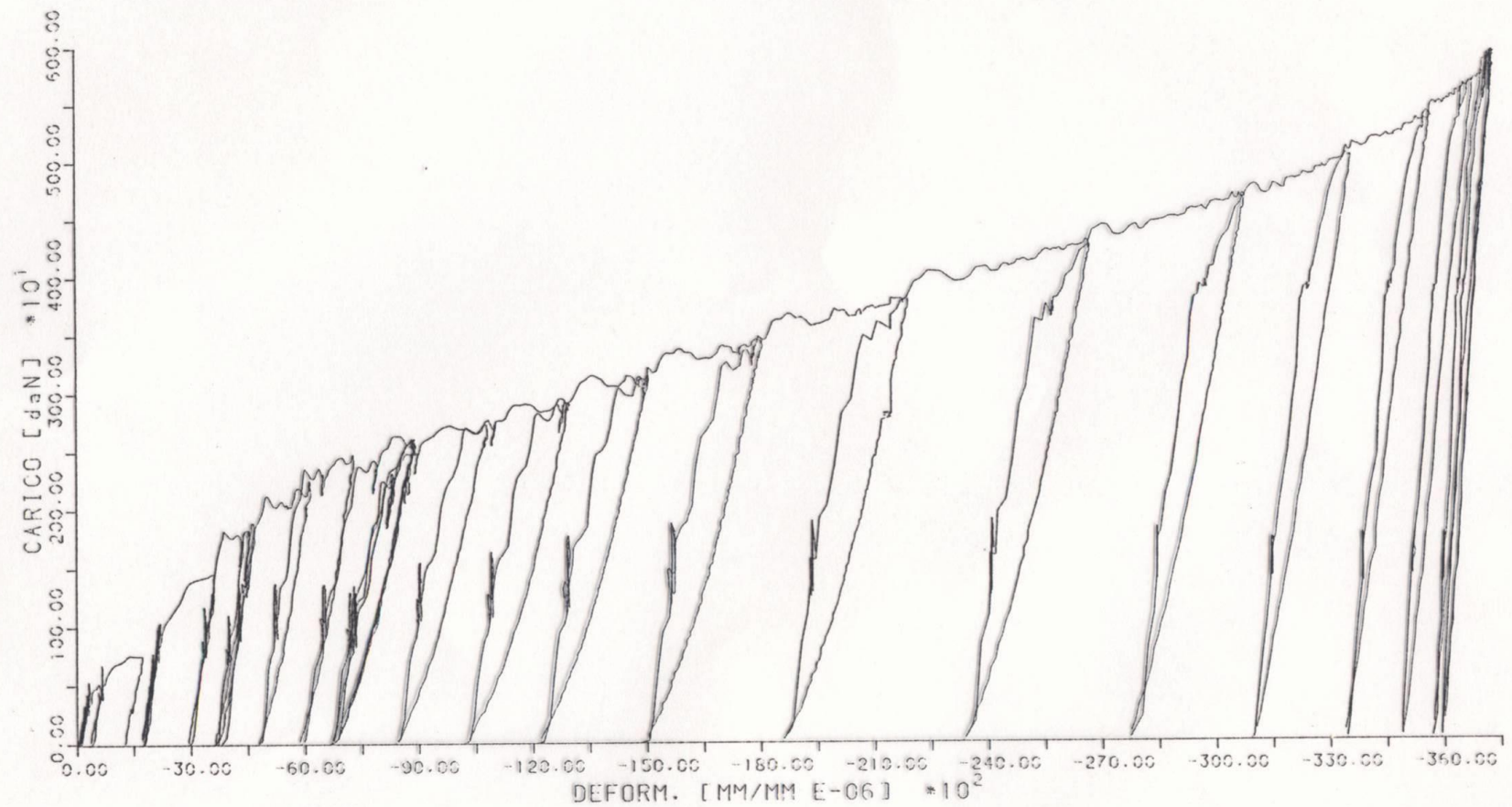




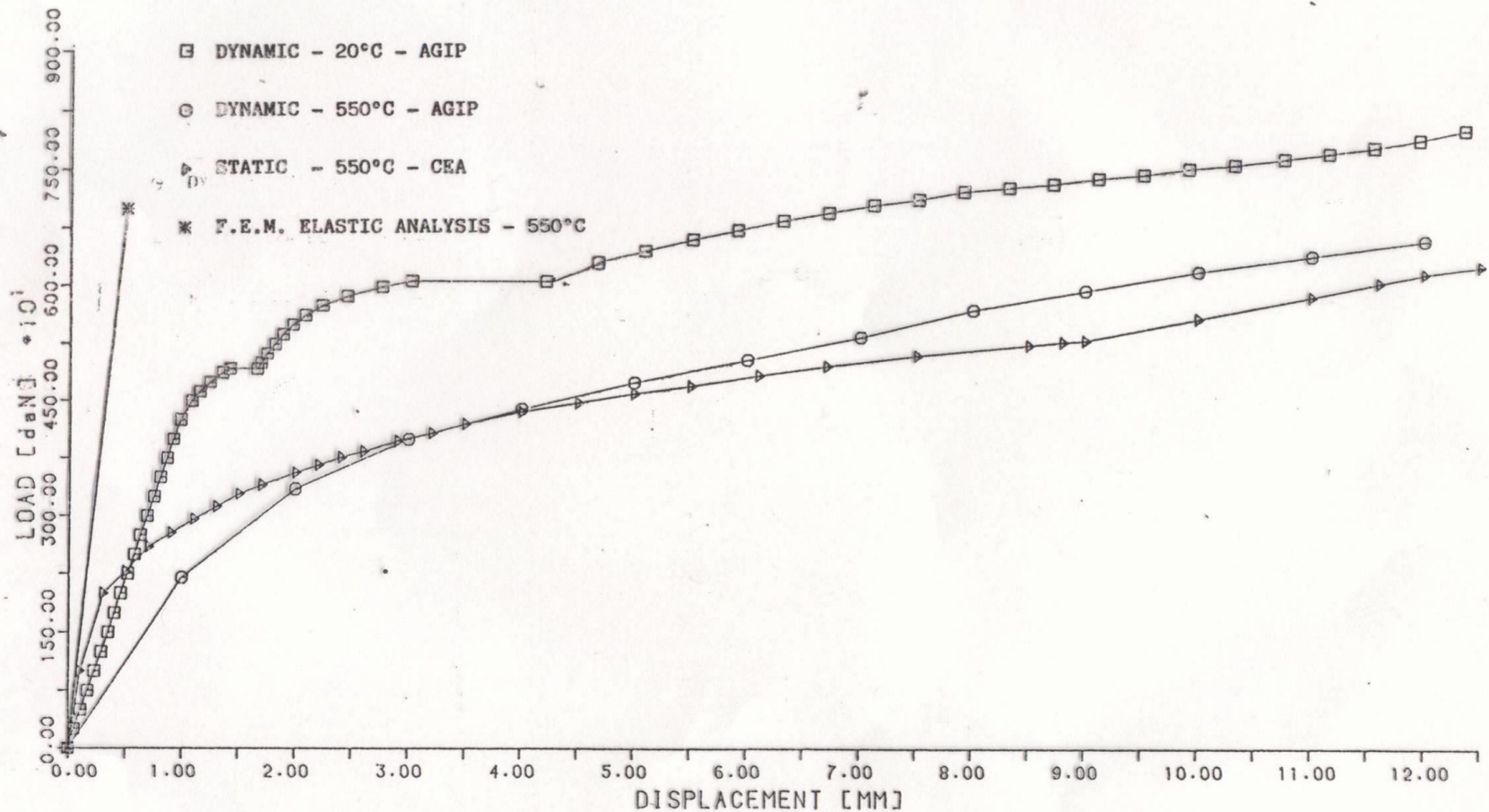


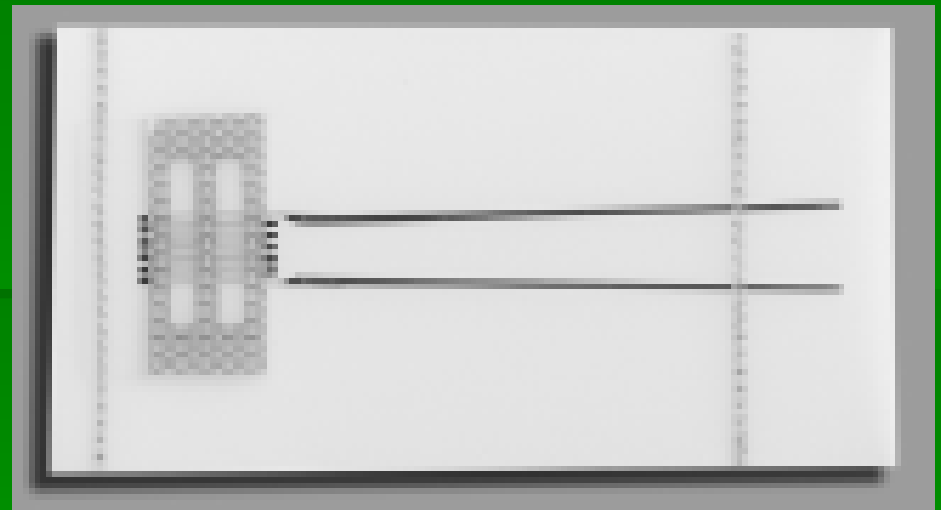


COLLASSO DINAMICO TRANS. SUP. EDC
CAMPIONE N.13 - CARICO/ESTENSIMETRO 2

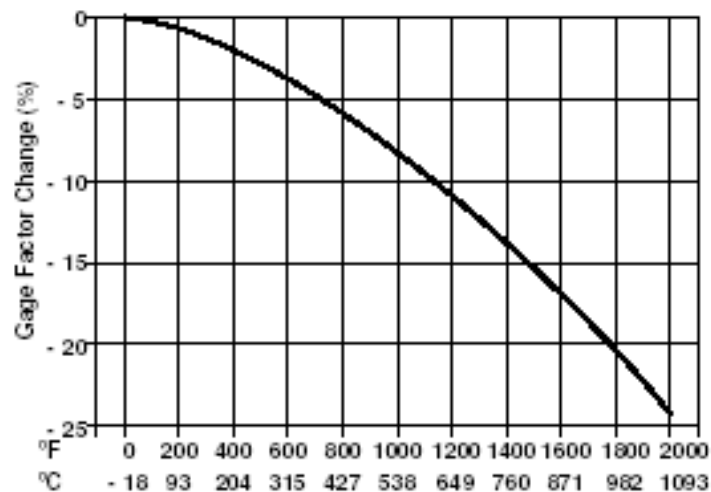


FUEL ELEMENT UPPER PAD SHROUD COMPARISON OF AGIP - CEA TEST RESULTS

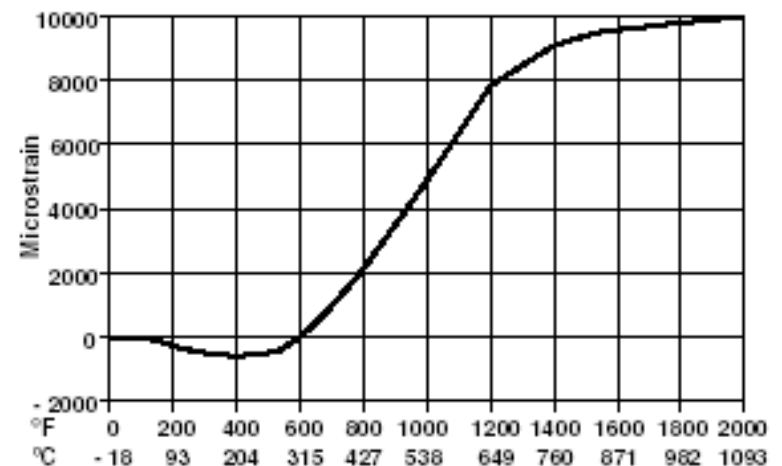


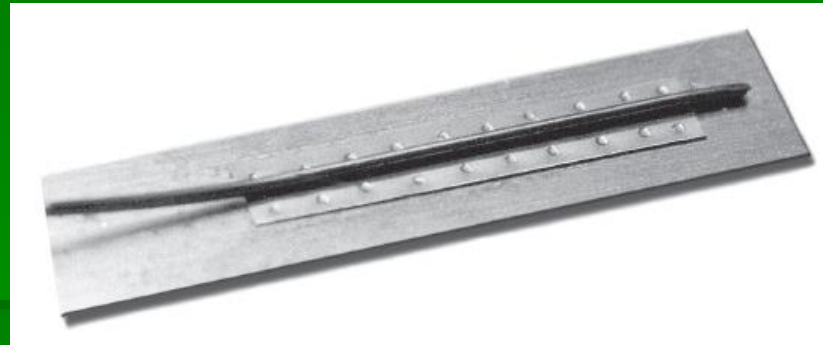


GAGE FACTOR VARIATION WITH TEMPERATURE FOR
ZC-SERIES GAGE

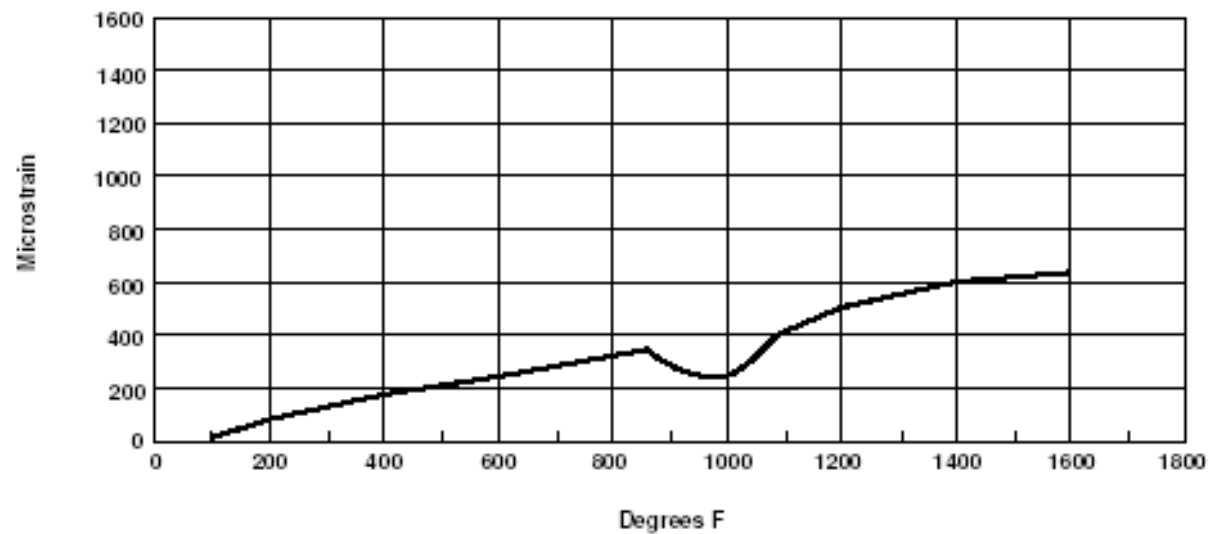


TYPICAL APPARENT STRAIN
ZC-SERIES GAGE ON TITANIUM WITH H CEMENT

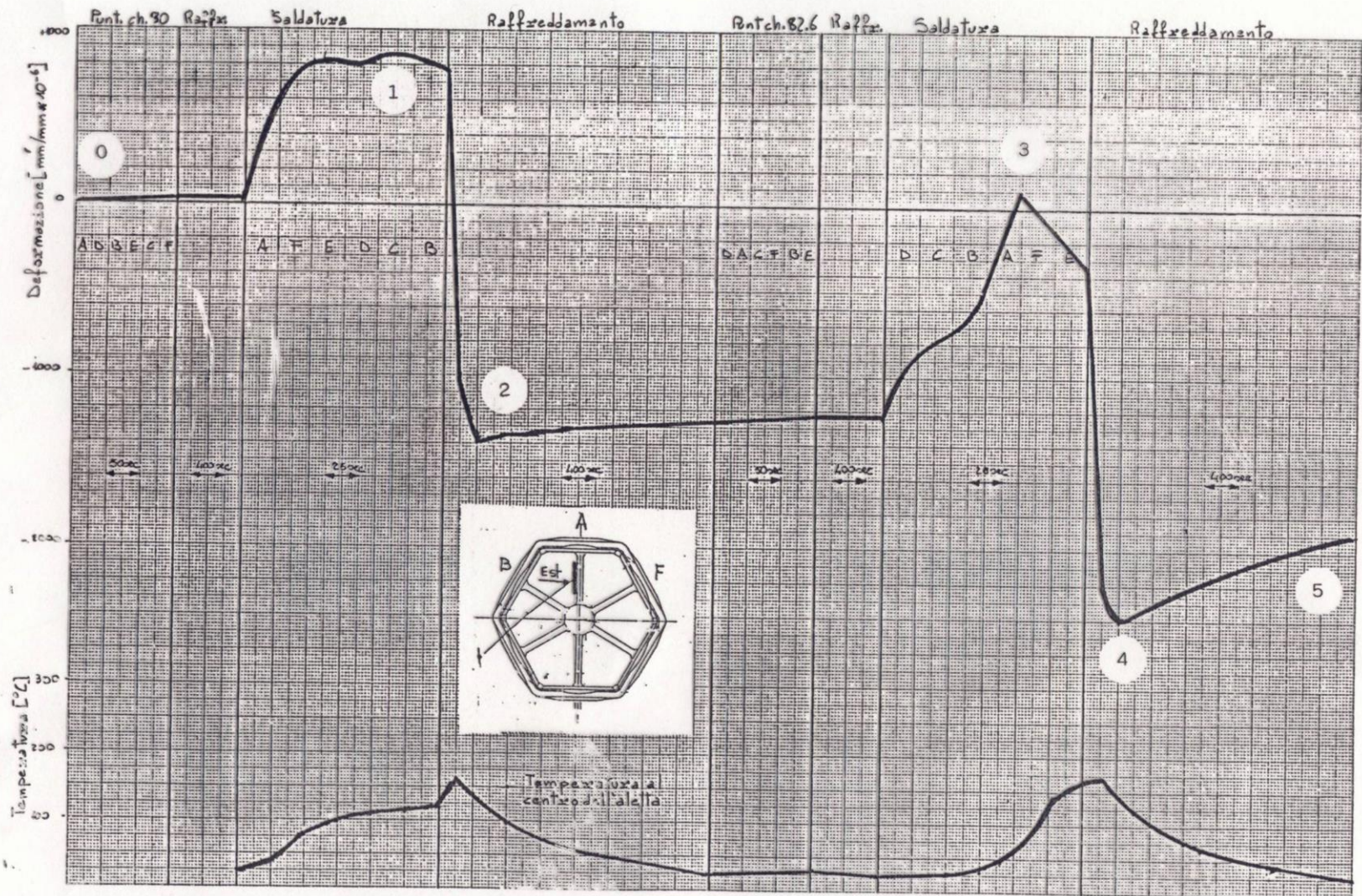




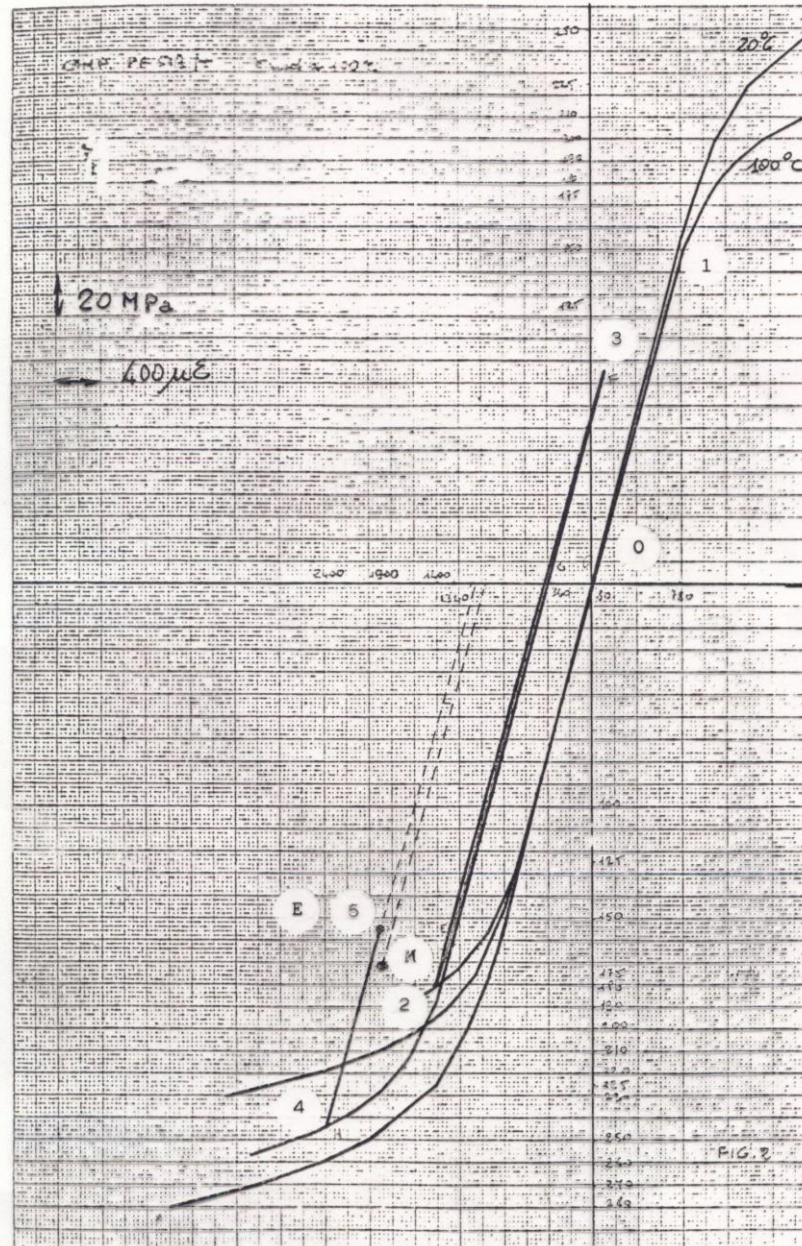
APPARENT STRAIN/THERMAL OUTPUT
ZC-NC-G1267-120 GAGE



SPECIMEN 519 - STANDARD WELDING



SPECIMEN 519 - STANDARD WELDING





Ente Nazionale Italiano di Unificazione

Prove non distruttive

Controllo mediante estensimetri elettrici a resistenza

Termini e definizioni	UNI 10478-1
Scelta degli estensimetri e dei componenti accessori	UNI 10478-2
Installazione estensimetrica e sua verifica	UNI 10478-3
Circuiti di misura, elaborazione e presentazione dei risultati	UNI 10478-4
Controllo delle caratteristiche	UNI 10478-5



Karl Hoffman

An Introduction to Measurements Using Strain Gauges

<http://www.hbm.com/it/menu/consigli-e-suggerimenti/analisi-sperimentale-delle-sollecitazioni/libro-di-riferimento/>

Grazie per l'attenzione

ANGELO FINELLI

finelli-angelo@alice.it