

# Verifica mediante banco a flessione della misura di tensione residua, in superficie e a bassa profondità, con il metodo del foro

C. Santus

DIMNP, Università di Pisa



A. Benincasa, L. Bertelli

SINT Technology, Firenze

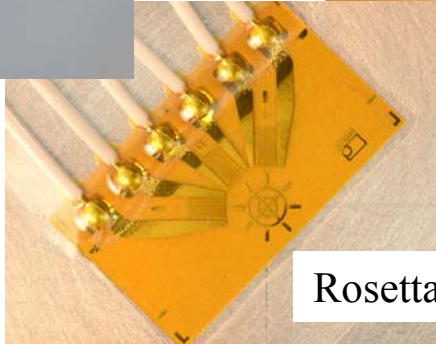
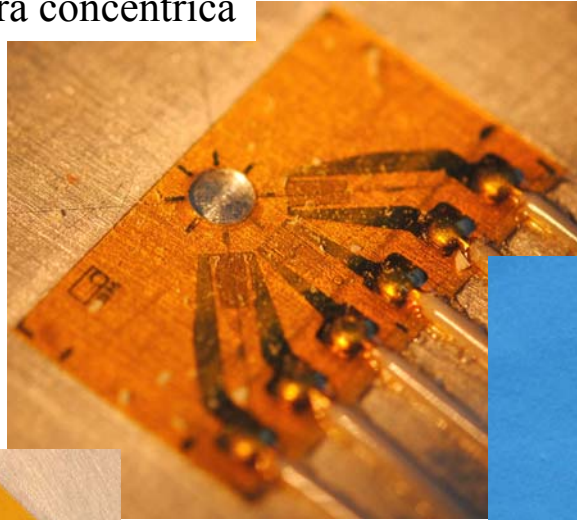


# Introduzione, il metodo del foro (Strain Gage Hole-Drilling method)



Fresa di foratura

Foratura concentrica



Rosetta a 3 griglie

- RESTAN – MTS 3000  
SINT Technology, Firenze
- automatic hole drilling operation
  - optical system to reduce eccentricity
  - air turbine, 350 000 g/min
  - hole diameter: 1.8 mm
  - depth: 2 mm



# Normative sul metodo del foro



ASTM E837 - 08e1 "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", 2008.



P.V. Grant, J.D. Lord, P.S. Whitehead. The measurement of residual stresses by the incremental hole drilling technique. Measurement Good Practice Guide N.53, (issue 2), 2006.



A. Ajovalasit, M. Scafidi, B. Zuccarello, M. Beghini, L. Bertini, C. Santus, E. Valentini, A. Benincasa, L. Bertelli. "The hole-drilling strain gauge method for the measurement of uniform or non-uniform residual stresses". AIAS Working Group on Residual Stresses. AIAS – TR01:2010, September 2010.



A. Ajovalasit, M. Scafidi, B. Zuccarello, M. Beghini, L. Bertini, C. Santus, E. Valentini, A. Benincasa, L. Bertelli. Il metodo di prova "AIAS - TR" per la misura delle tensioni residue costanti o variabili con la tecnica del foro incrementale. Gruppo di lavoro AIAS sulle tensioni residue - TR01. Congresso AIAS XXXIX, Maratea (PZ), 2010.

# Recenti sviluppi del metodo del foro

## Effetto di plasticità



M. Beghini, L. Bertini, C. Santus. A procedure for evaluating high residual stresses using the blind hole drilling method, including the effect of plasticity. *J. Strain Analysis*, Vol. 45, pp.301-318. 2010. *CEGB Prize winner for JSA 2010.*

## Funzioni di Influenza



M. Beghini, L. Bertini, L.F. Mori. "Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part I: Definition and Validation of the Influence Functions", *Strain*, 46(4): 324-336, 2010.

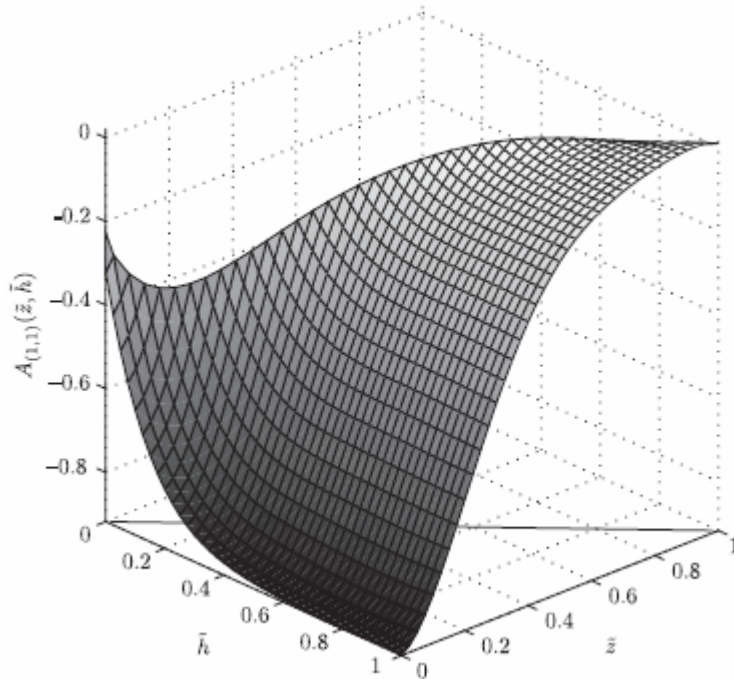


M. Beghini, L. Bertini, L.F. Mori. "Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part II: Application of the Influence Functions to the Inverse Problem", *Strain*, 46(4): 337-346, 2010.

# Recenti sviluppi del metodo del foro



M. Beghini, L. Bertini, L.F. Mori. Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part I & PartII. Strain 2010



## Influence Functions IF (Funzioni di influenza)

Def. rilassate come risultato di integrazione delle tensioni con IF come kernel

$$\varepsilon(h) = \frac{1}{ER} \int_0^h \mathbf{A}(z, h) \sigma(z) dz,$$

Approccio originale e generale:

- forma della distribuzione di tensione qualunque,
- distinzione fra step di **misura** e step di **calcolo**,
- **eccentricità** come parametro geometrico.

# Verifiche sperimentali del metodo del foro. Confronto raggi X.



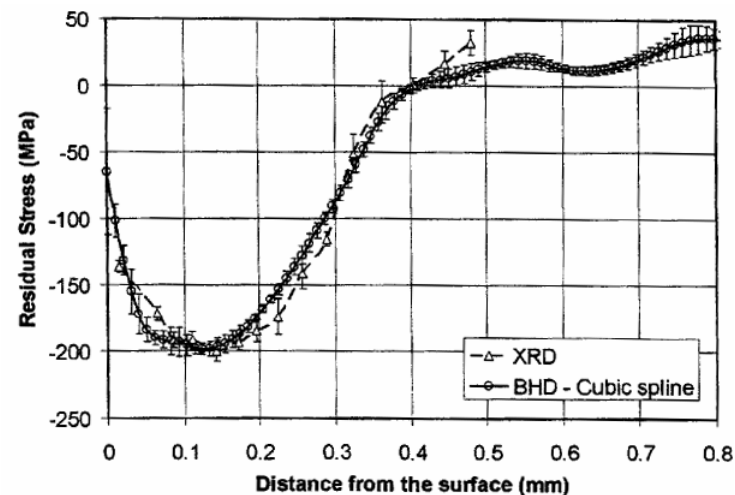
V. Fontanari, F. Frenzo, T. Bartolomei, P. Scardi. Comparison of the hole-drilling and X-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminium alloys. *J. Strain Analysis*, Vol. 40, pp.199-209. 2005.



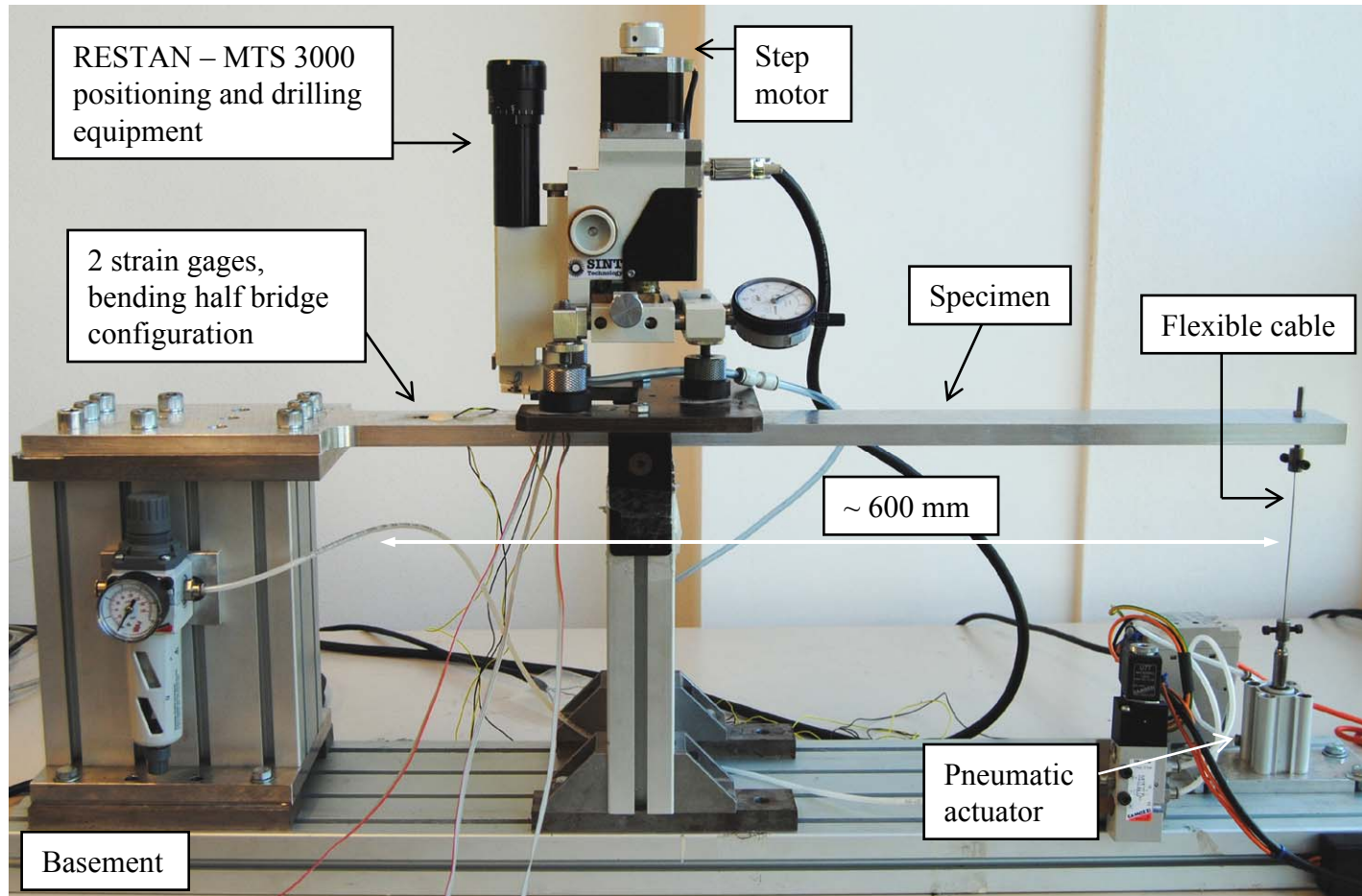
E. Valentini, C. Santus, M. Bandini. Residual stress analysis of shot-peened aluminum alloy by fine increment hole-drilling and X-ray diffraction methods. *ICM 11. Procedia Engineering*. 2011.



E. Valentini, M. Beghini, L. Bertini, C. Santus M. Benedetti. Procedure to Perform a Validated Incremental Hole Drilling Measurement: Application to Shot Peening Residual Stresses. *Strain* Vol. 47, pp.e605-e618. 2011.

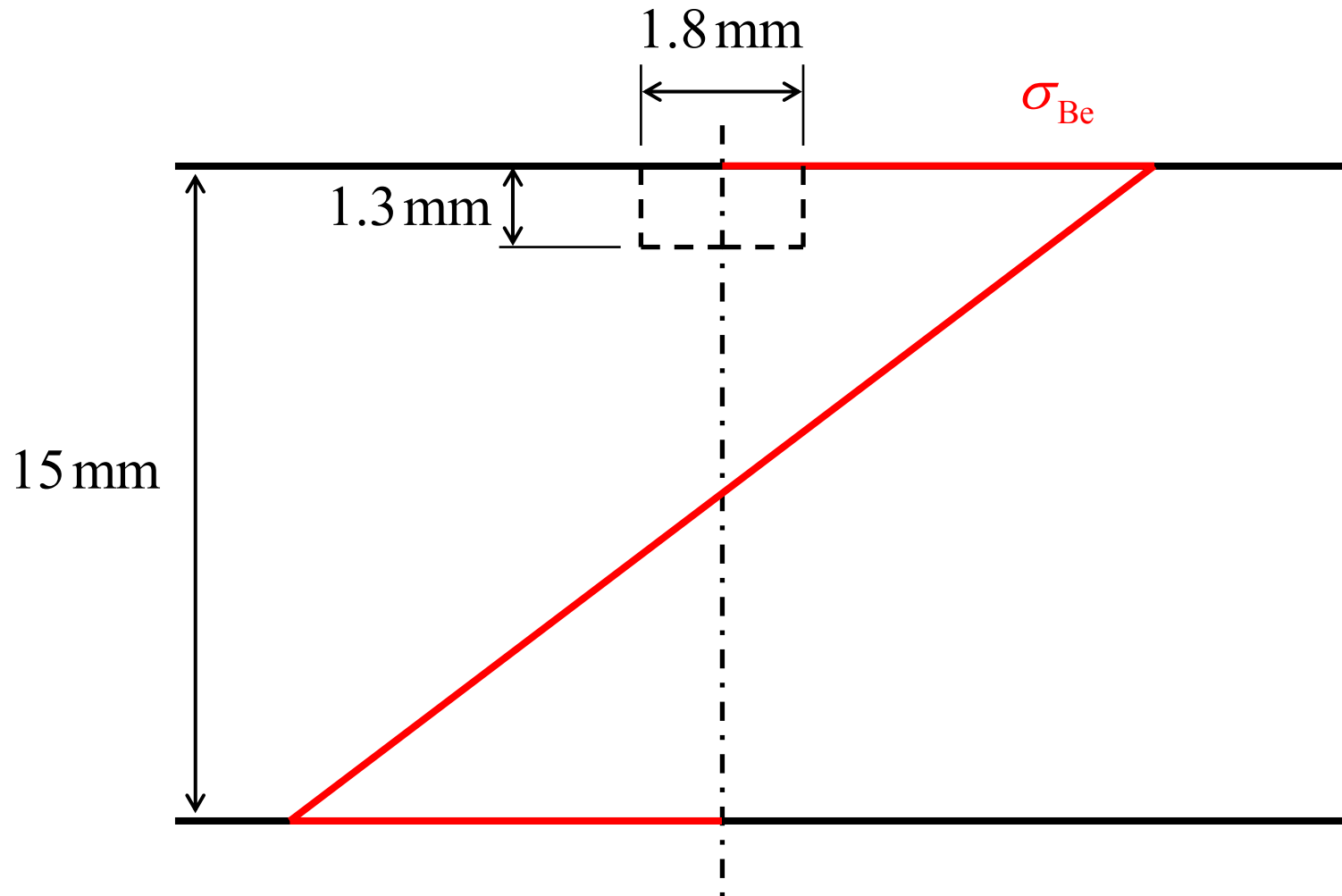


# Verifica mediante banco a flessione



Tensione di flessione (*riferimento*) nota con **elevata accuratezza**.  
Tensione residua simulata dalla tensione di flessione.

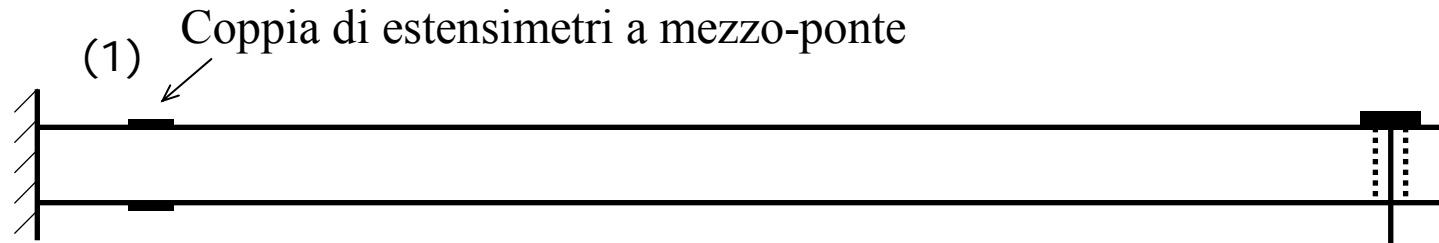
# Banco a flessione, stato di tensione di riferimento.



Stato di tensione di flessione:

- monoassiale
- pressoché uniforme nella profondità del foro

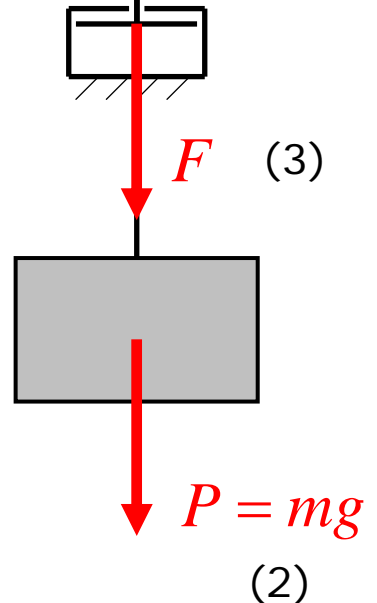
# Accuratezza tensione di flessione. Misura del carico applicato.



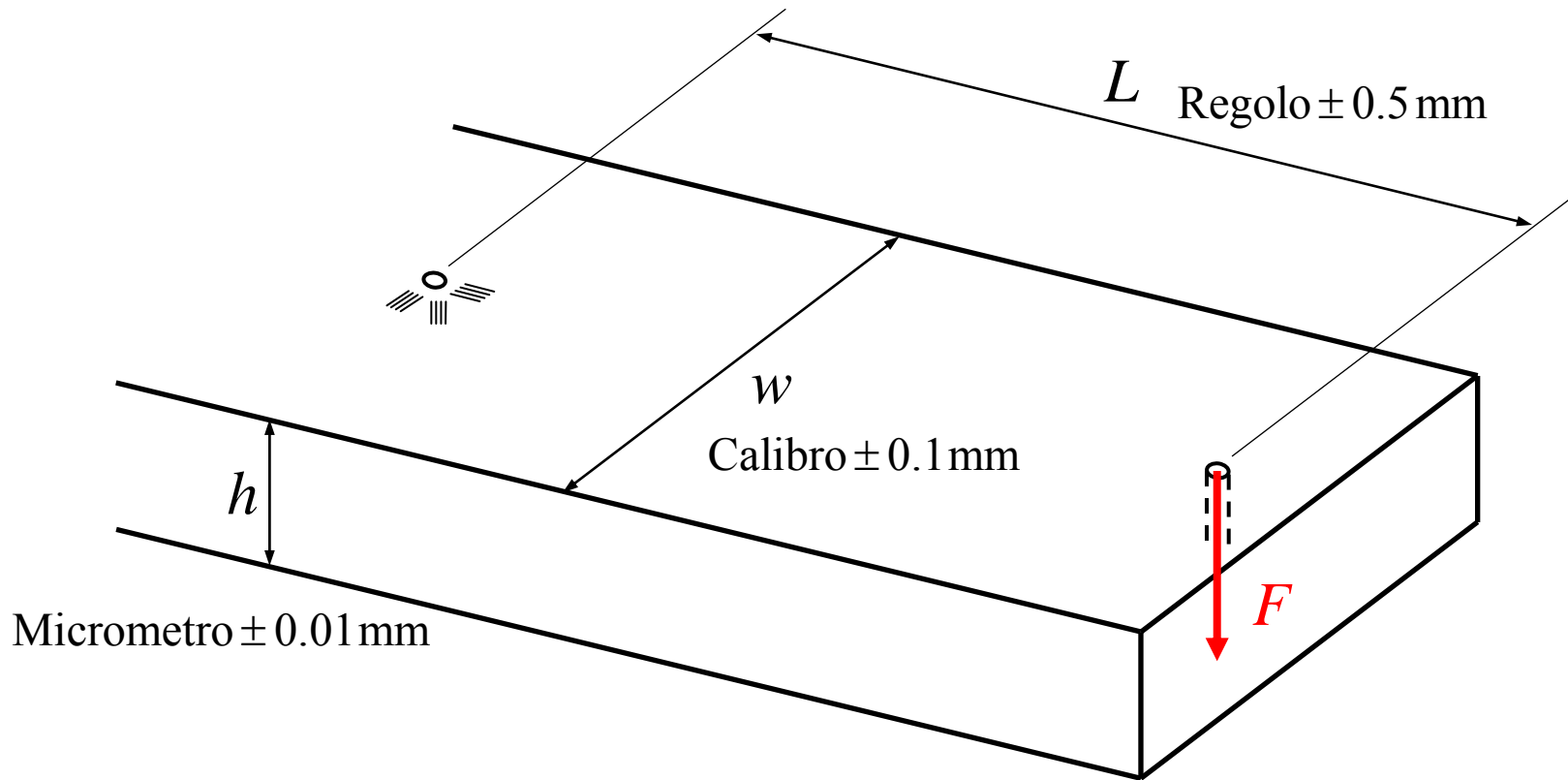
1) Applicazione di una coppia di estensimetri collegati a mezzo-ponte.  
Azzeramento segnale.

2) Applicazione di un peso (massa nota con precisione  $< 0.1 \%$ ).  
Lettura del segnale estensimetrico.

3) Carico eseguito dall'attuatore pneumatico.  
Lettura del segnale estensimetrico.  
Valore del carico per similitudine (**linearità estensimetro**).

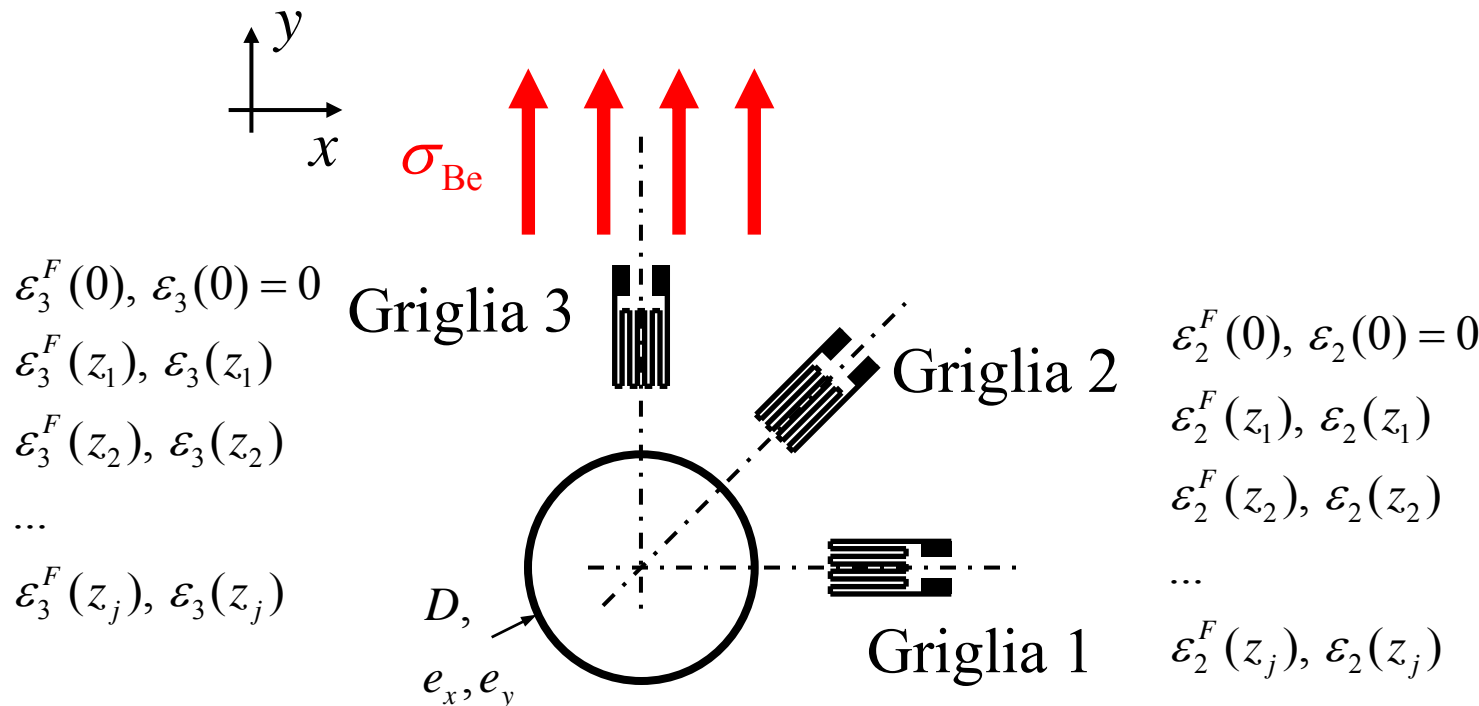


# Accuratezza tensione di flessione



$$\sigma_{\text{Be}} = \frac{F L}{w h^2 / 6}, \text{ incertezza } < 1\%$$

# Sequenza di misura



$\varepsilon_3^F(0), \varepsilon_3(0) = 0$   
 $\varepsilon_3^F(z_1), \varepsilon_3(z_1)$   
 $\varepsilon_3^F(z_2), \varepsilon_3(z_2)$   
 ...  
 $\varepsilon_3^F(z_j), \varepsilon_3(z_j)$

$\varepsilon_2^F(0), \varepsilon_2(0) = 0$   
 $\varepsilon_2^F(z_1), \varepsilon_2(z_1)$   
 $\varepsilon_2^F(z_2), \varepsilon_2(z_2)$   
 ...  
 $\varepsilon_2^F(z_j), \varepsilon_2(z_j)$

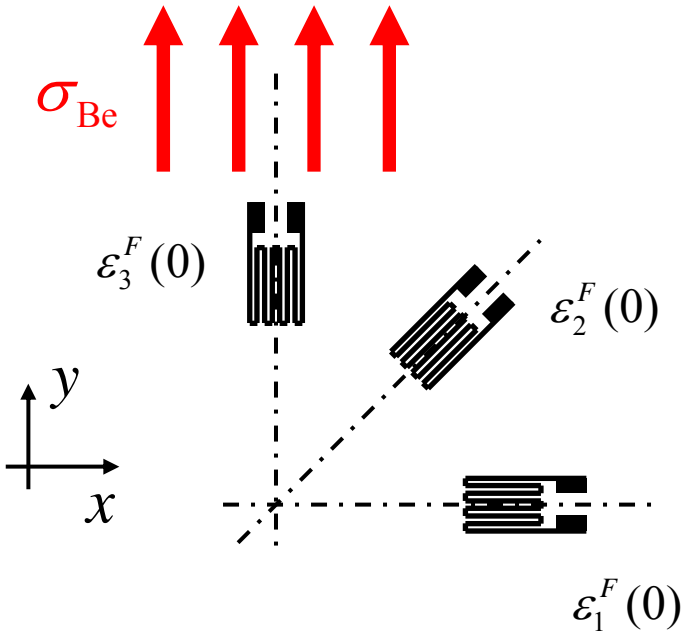
$\varepsilon_1^F(0), \varepsilon_1(0) = 0$   
 $\varepsilon_1^F(z_1), \varepsilon_1(z_1)$   
 $\varepsilon_1^F(z_2), \varepsilon_1(z_2)$   
 ...  
 $\varepsilon_1^F(z_j), \varepsilon_1(z_j)$

1) Calibrazione prima dell'esecuzione del foro

2) Esecuzione del foro incrementale e misura delle deformazioni rilassate dovute alla flessione

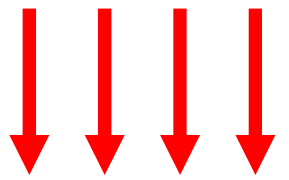
3) Misura (mediante comparatori) del diametro del foro e dell'eccentricità (dell'ordine di pochi centesimi di mm)

# Moduli di elasticità del materiale



$$E = \frac{\sigma_{Be}}{\epsilon_3^F(0)}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_1^F(0)}{\epsilon_3^F(0)}$$

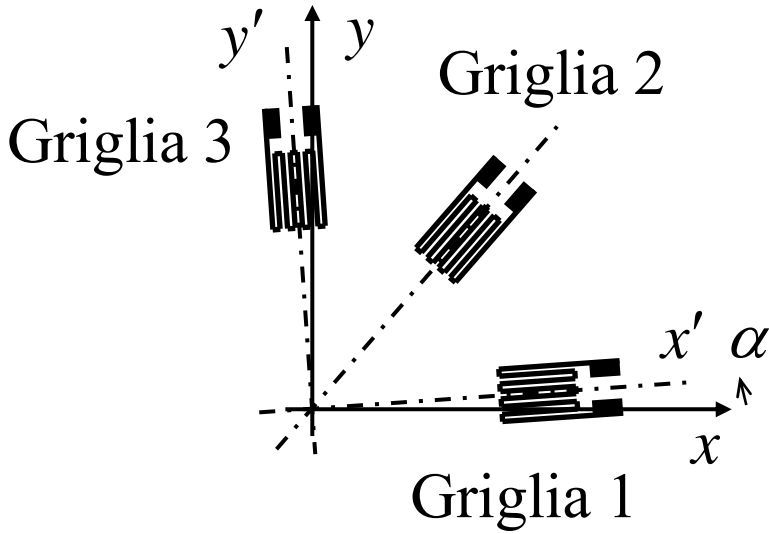


$$\epsilon = 4 \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{GK} \quad K = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\epsilon}$$

$$\sigma = E\epsilon = 4 \frac{\Delta V}{V} \frac{E}{GK}$$

← Termine di calibrazione

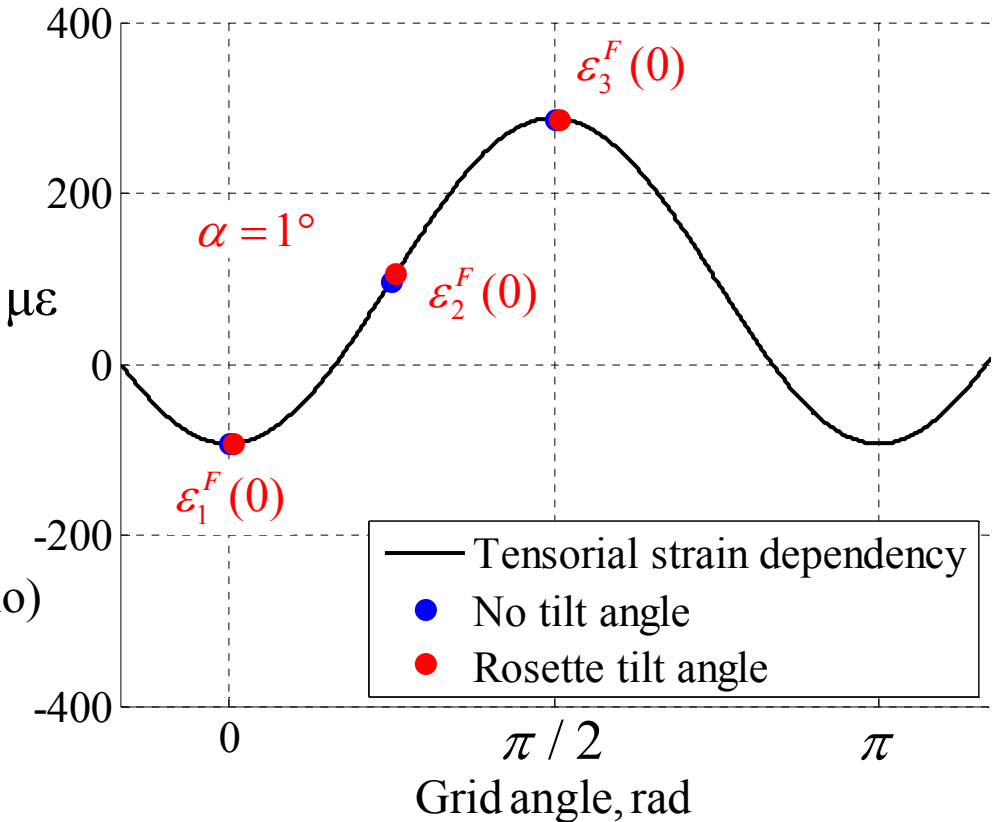
# Disallineamento angolare della rosetta



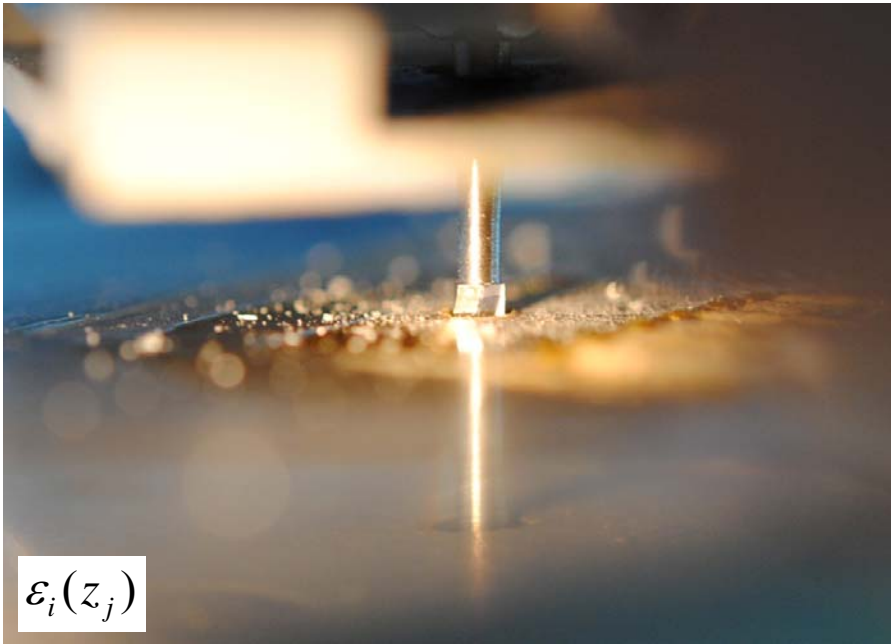
$\varepsilon_1^F(0), \varepsilon_3^F(0)$   
non sensibili a piccoli valori di  $\alpha$

$$\varepsilon_2^F(0) = \frac{\varepsilon_1^F(0) + \varepsilon_3^F(0)}{2}, \quad \alpha = 0$$

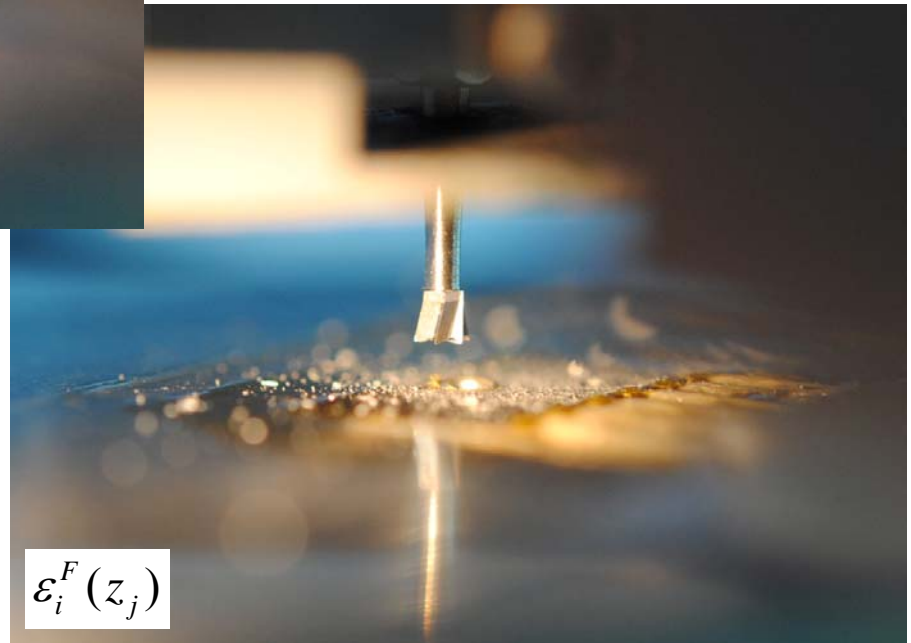
$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1^F(0) - 2\varepsilon_2^F(0) + \varepsilon_3^F(0)}{\varepsilon_1^F(0) - \varepsilon_3^F(0)} \quad (\alpha \text{ piccolo})$$



# Esecuzione della prova

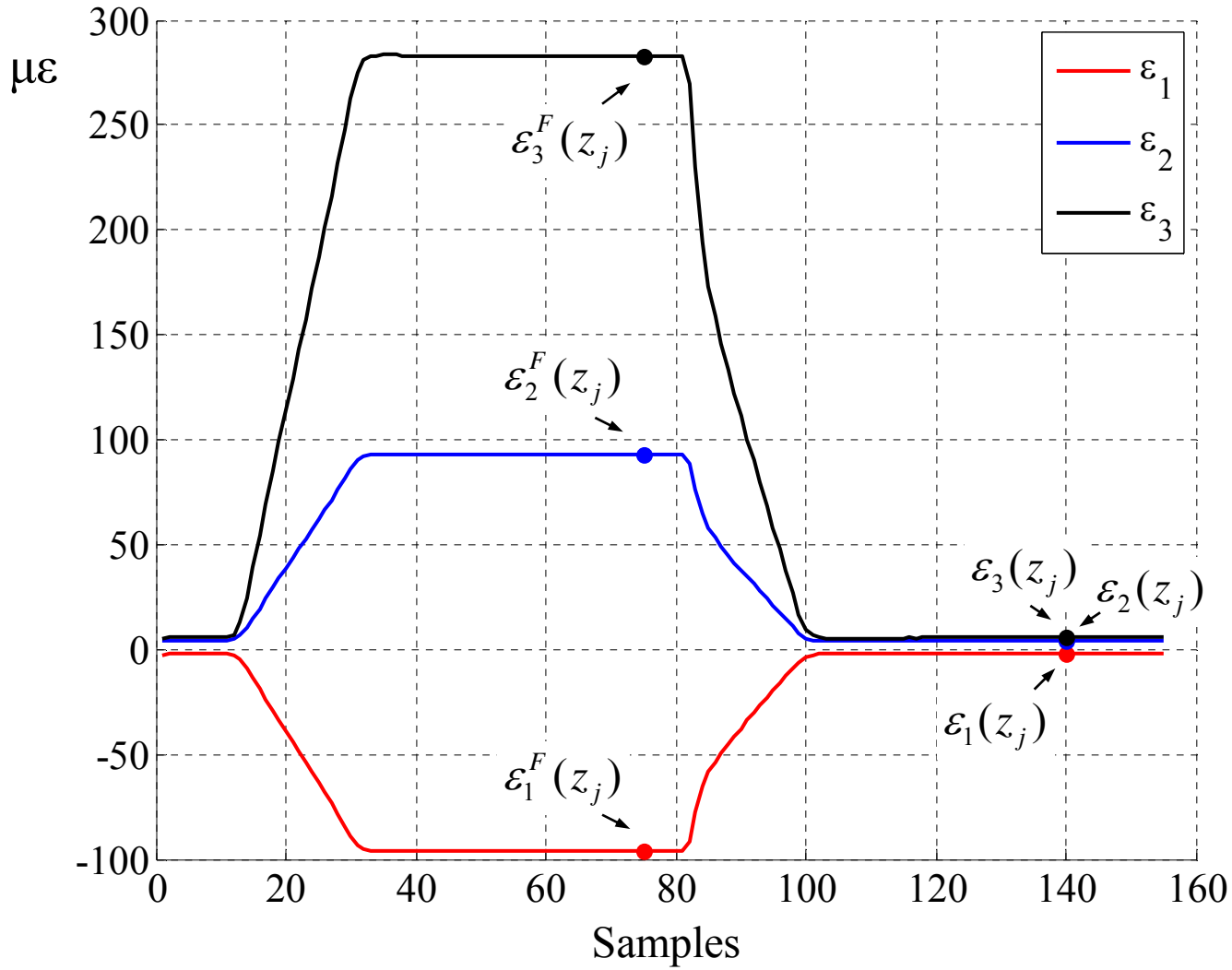


1) Foratura, senza carico di flessione



2) Applicazione del carico

# Separazione tensione residua / tensione di flessione



# Separazione tensione residua / tensione di flessione

$$\varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j) = \varepsilon_i(z_j)$$

Termine non nullo

$$\varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j) = \varepsilon_i(z_j) - \varepsilon_i(0)$$

Deformazioni rilassate,  
nulle a profondità zero

$$\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j) = (\varepsilon_i^F(z_j) - \varepsilon_i^F(0)) - \varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j)$$

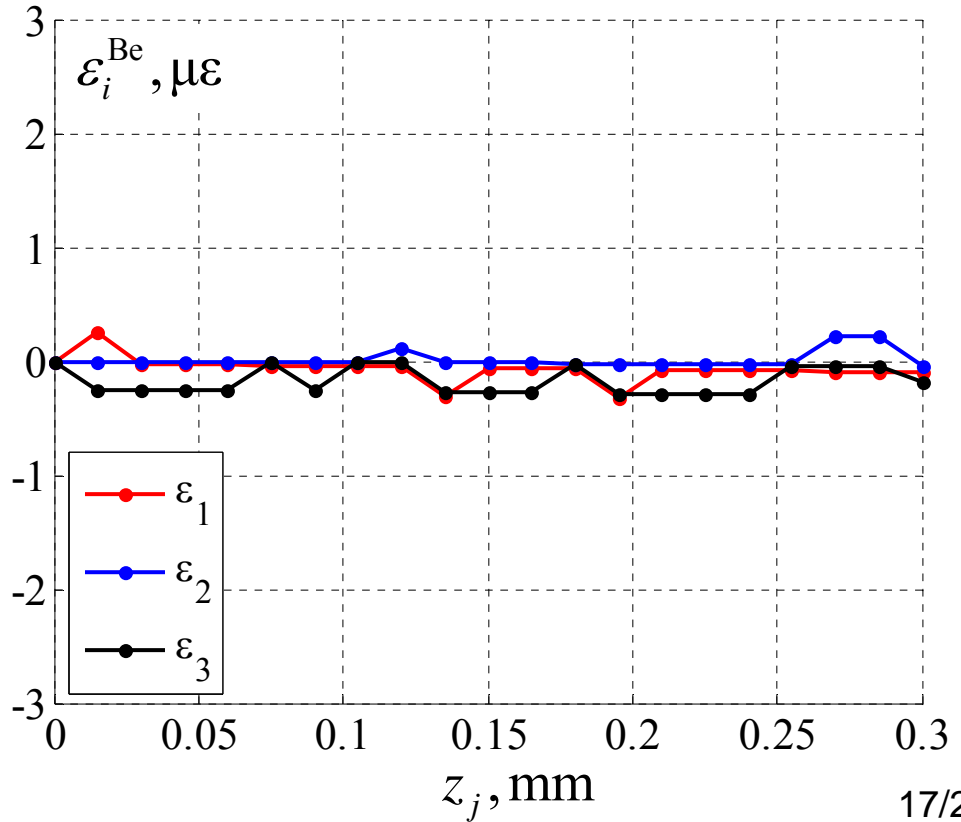
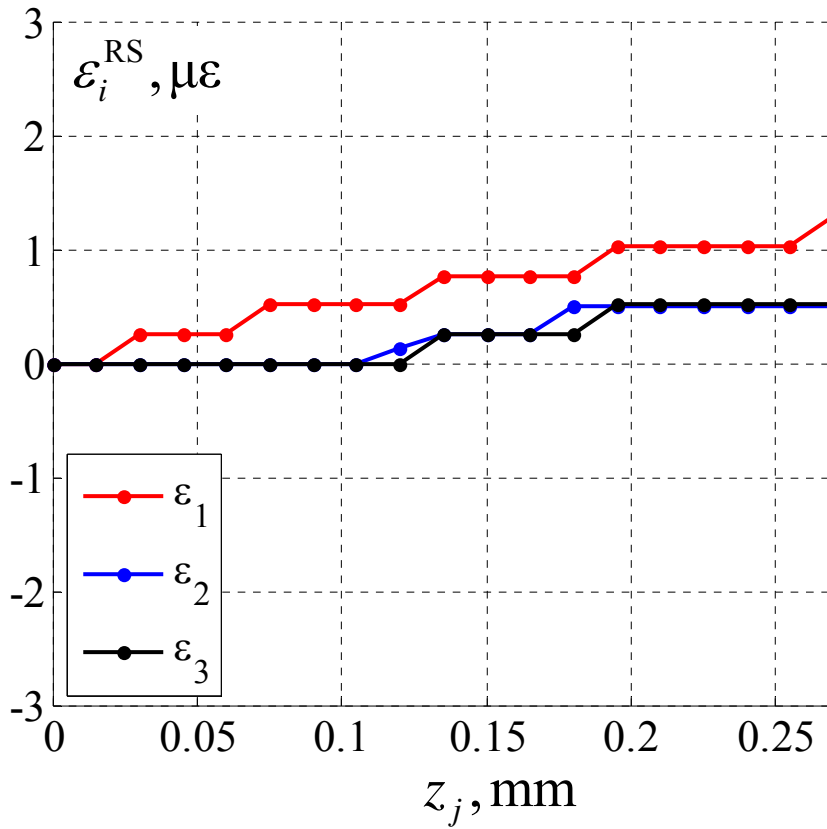
$$\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j) = (\varepsilon_i^F(z_j) - \varepsilon_i^F(0)) - (\varepsilon_i(z_j) - \varepsilon_i(0))$$

$$i = 1, 2, 3$$

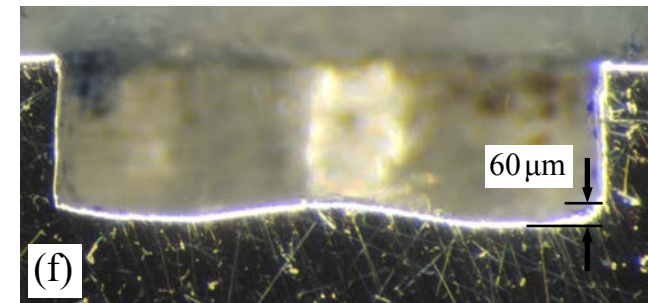
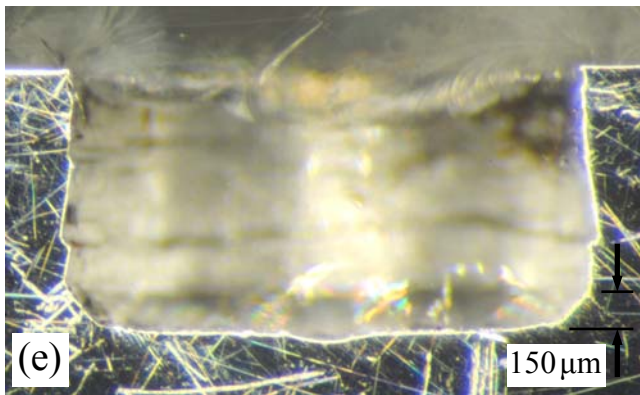
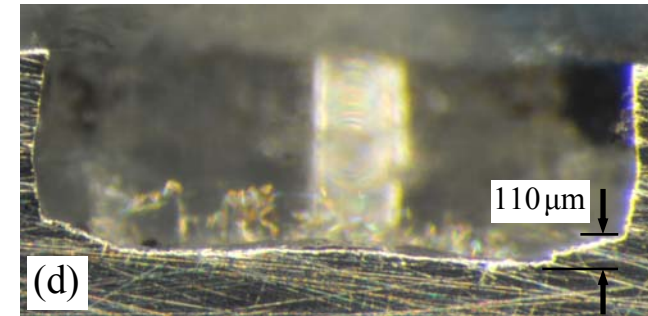
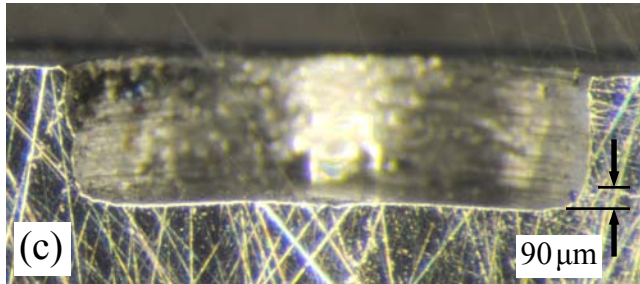
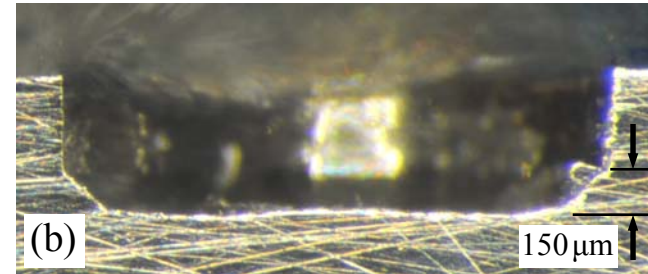
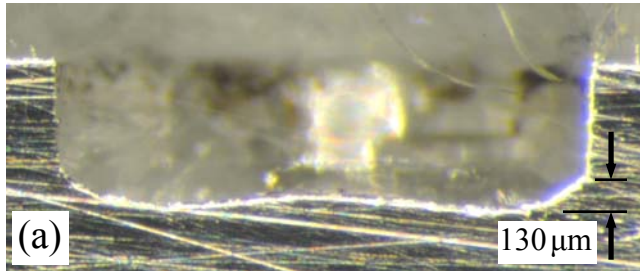
$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$n = 130, \quad z_{j+1} - z_j = 10 \mu\text{m}, \quad \text{total depth: } z_n = 1.30 \text{ mm}$$

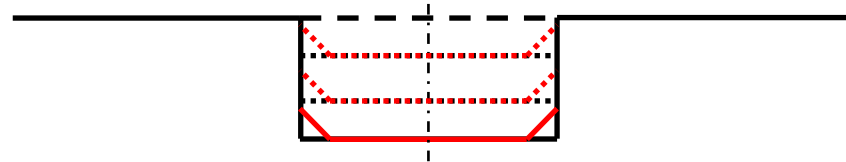
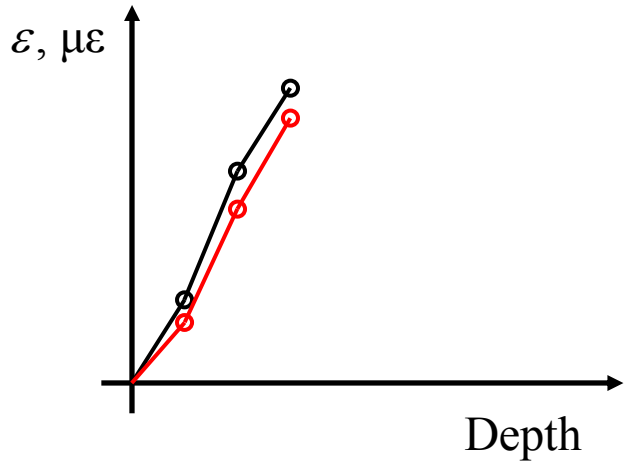
# Deriva estensimetrica, prova a vuoto



# Differenti utensili di fresatura



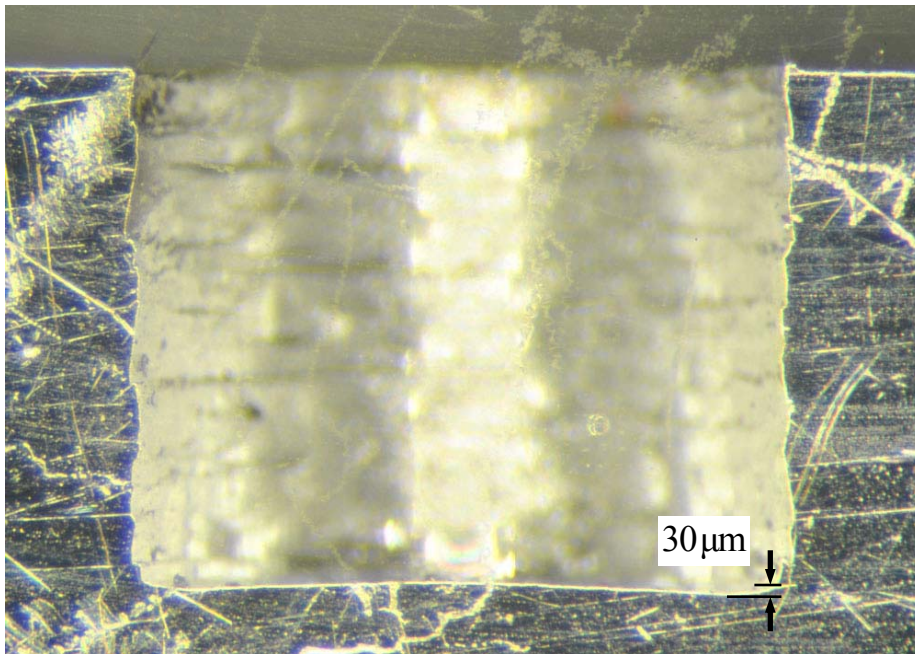
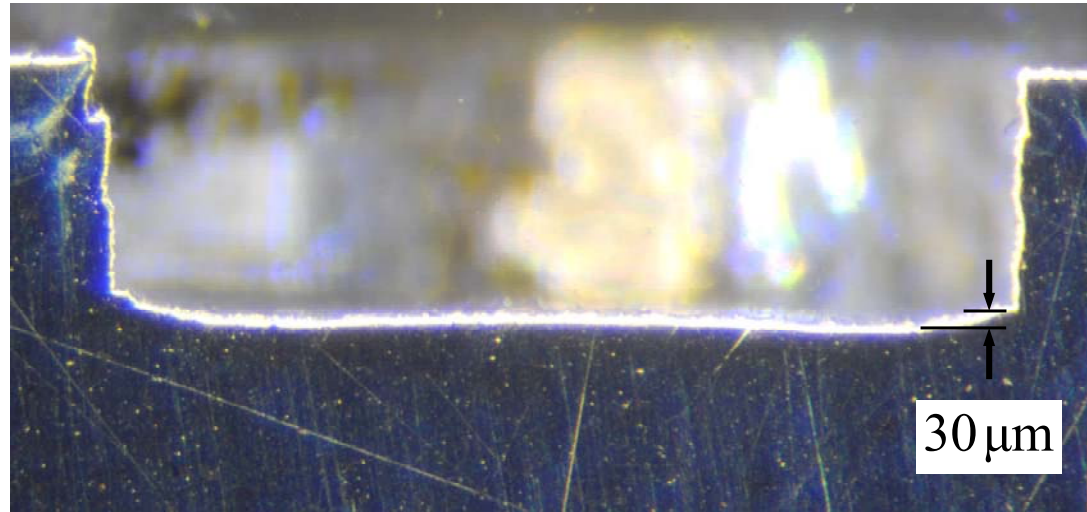
# Effetto di non planarità del fondo del foro



M. Scafidi, E. Valentini, B. Zuccarello. "Effetti del raggio di raccordo al fondo foro nella analisi delle tensioni residue con il metodo della rosetta forata". Congresso AIAS XXXVI, Ischia (NA), 2007.

[Ricontrollare ordine autori](#)

# Selezione della fresa che genera la migliore forma del foro



Errore di non planarità molto ridotto

# Risultati. Confronto deformazioni rilassate misurate / attese.

$$S' = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \sigma_{\text{Be}} \frac{h/2 - z}{h/2} \\ \alpha \sigma_{\text{Be}} \frac{h/2 - z}{h/2} & \sigma_{\text{Be}} \frac{h/2 - z}{h/2} \end{bmatrix}$$



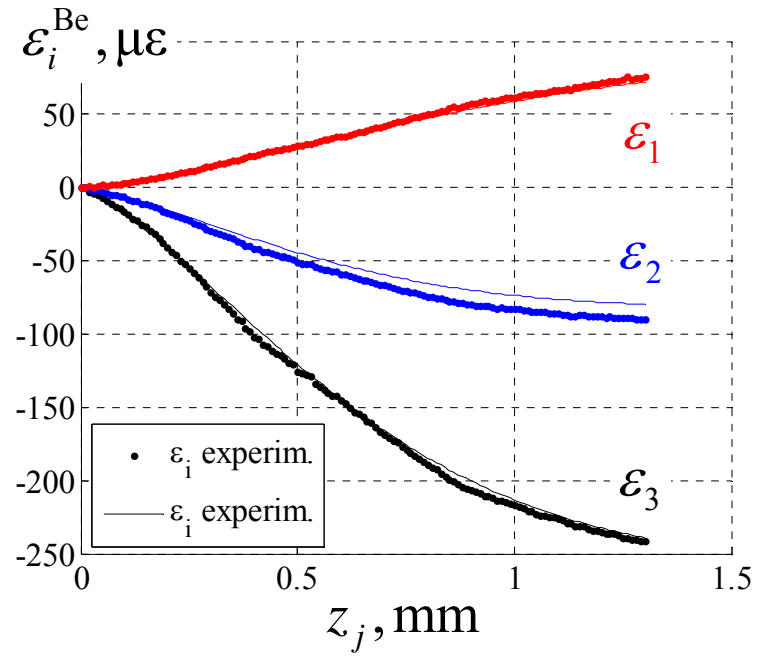
Integrazione IFs



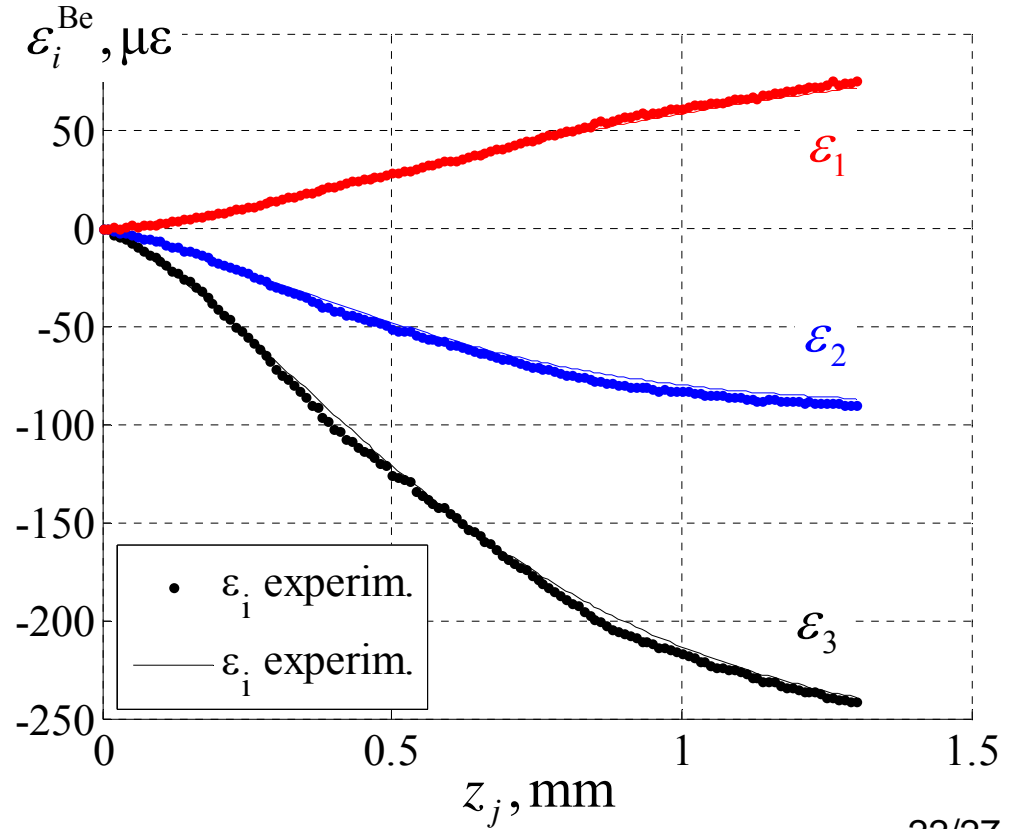
Valori attesi (expected) delle deformazioni rilassate

$$\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j)$$

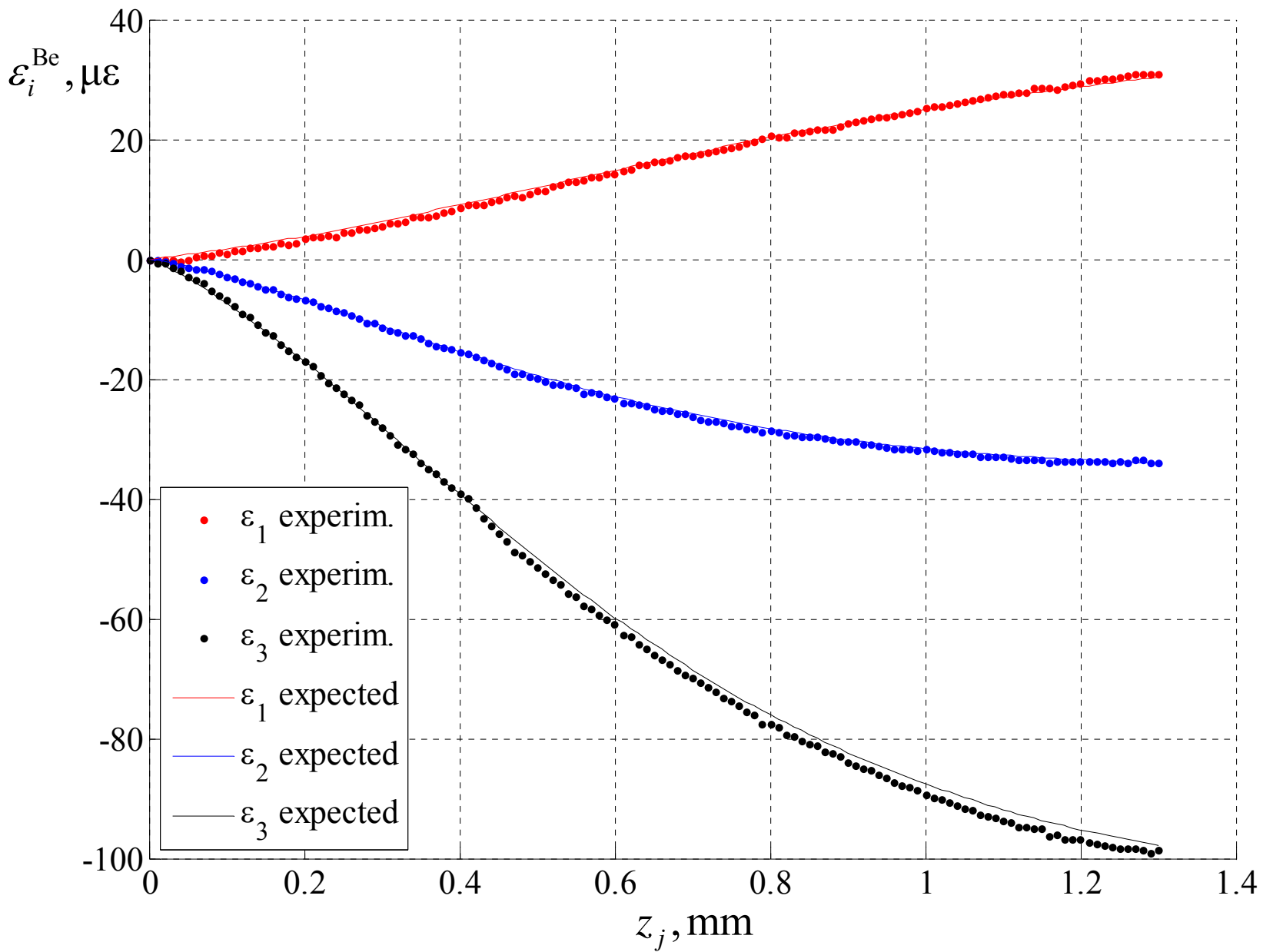
# Confronto deformazioni rilassate misurate / attese



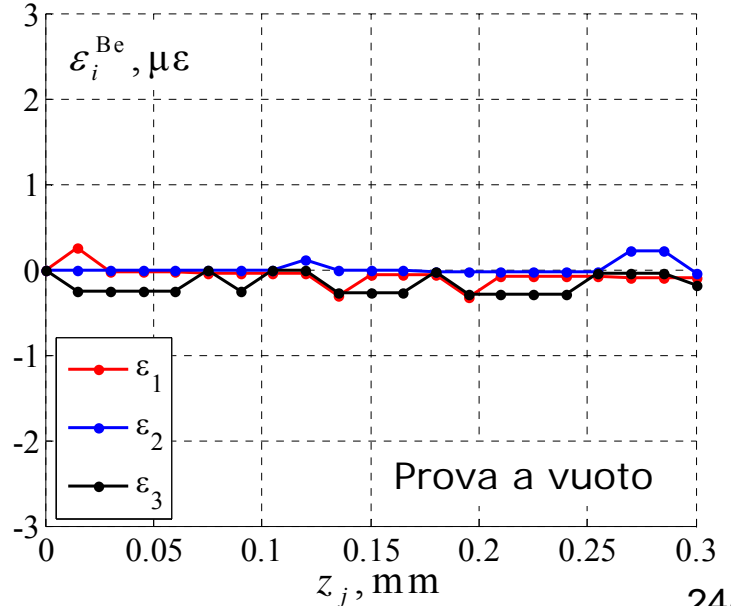
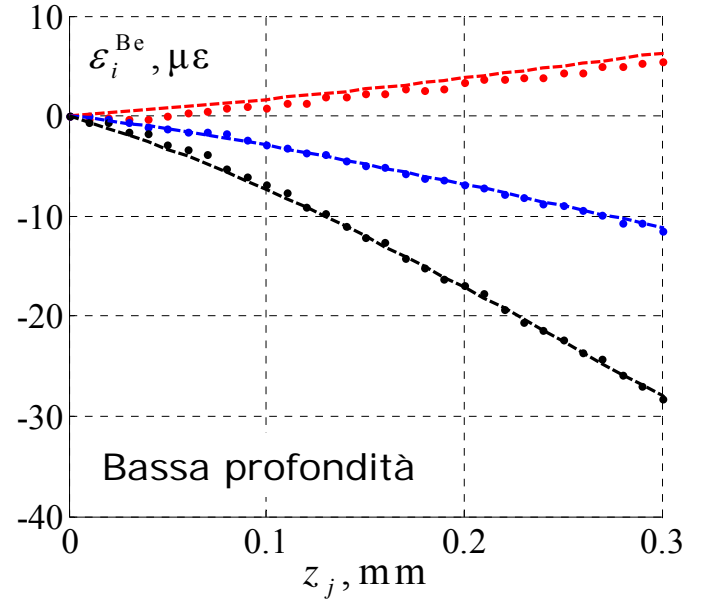
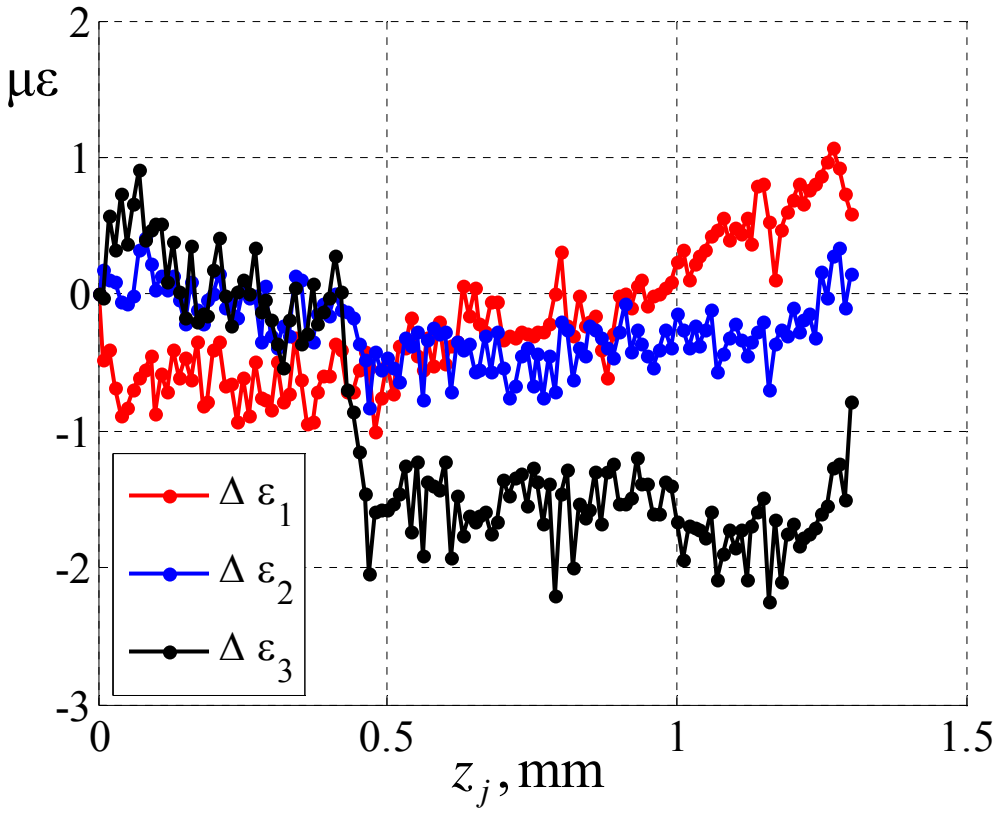
## Correzione disallineamento angolare



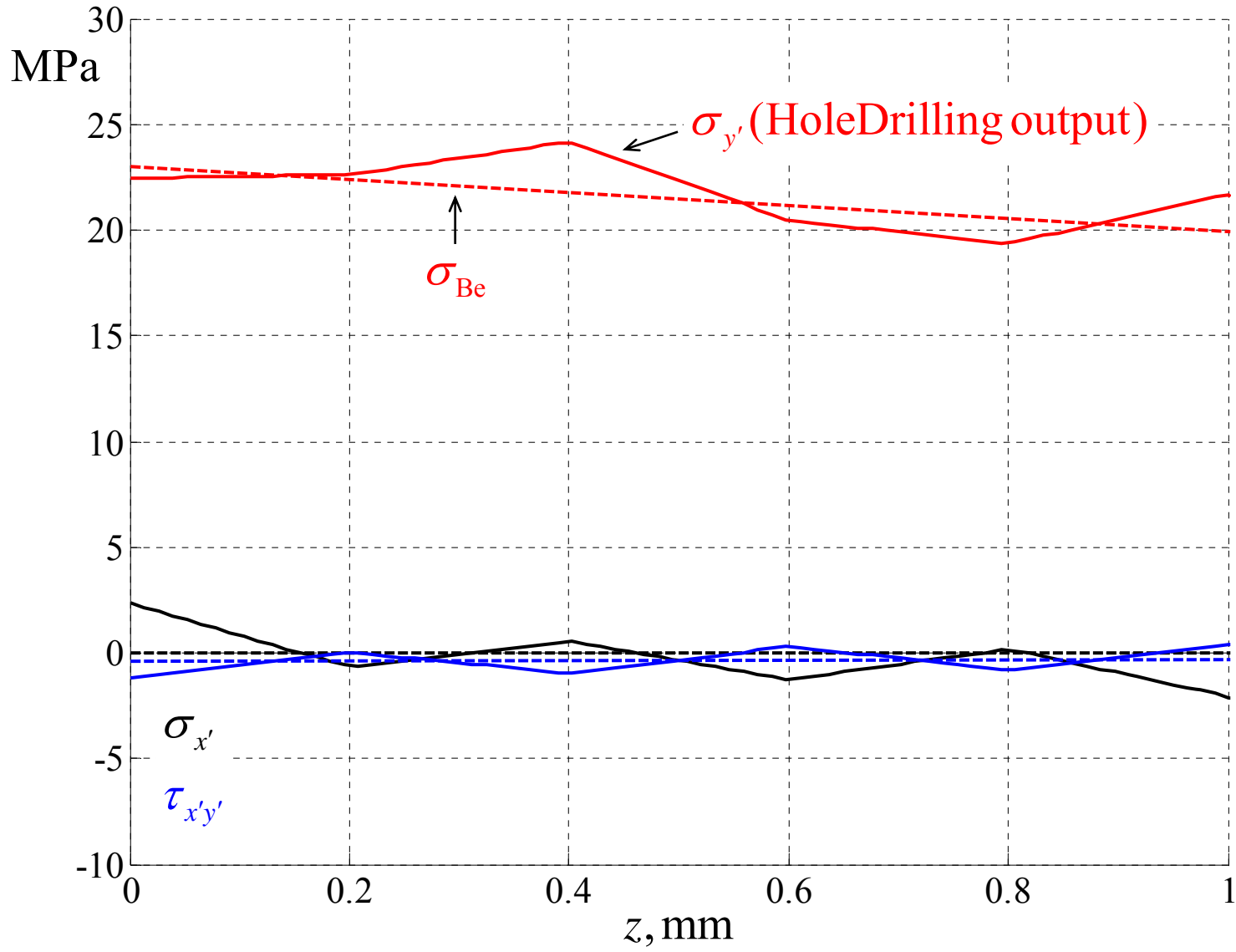
# Confronto deformazioni rilassate misurate / attese



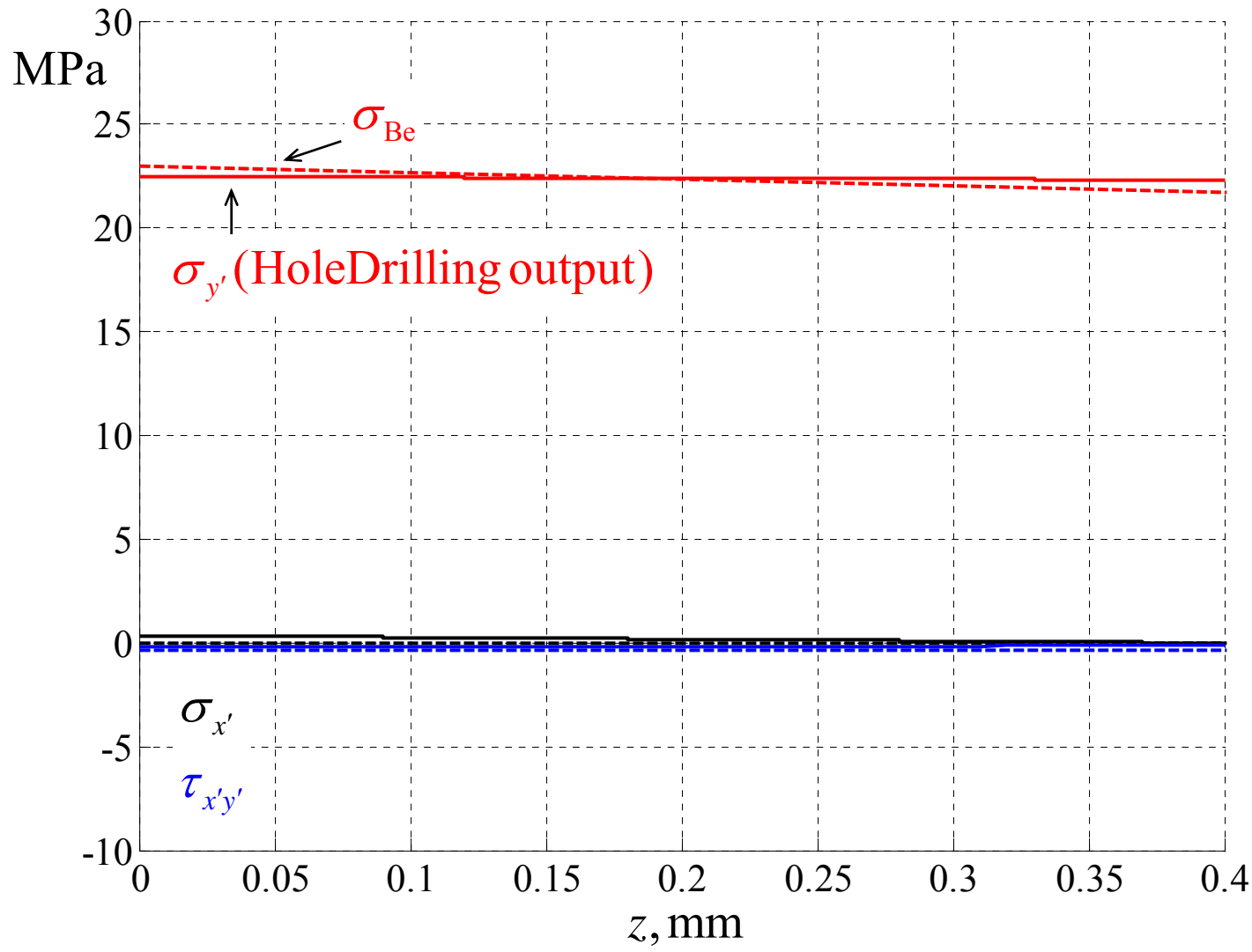
# Differenza deformazioni rilassate misurate / attese



# Confronto tensione ricostruita / tensione di riferimento



# Confronto tensione ricostruita / tensione di riferimento *bassa profondità*



# Conclusioni

- Banco a flessione.
  - Verifica molto accurata del metodo del foro (incertezza sulla tensione di riferimento  $< 1\%$ ).
  - Misura dei moduli di elasticità / costante estensimetro, angolo di disallineamento rosetta.
- Selezione di una fresa che genera un profilo del fondo foro con notevole planarità.
- Eccellente confronto **deformazioni rilassate sperimentali / attese**.
- Eccellente confronto **tensione ricostruita / tensione di riferimento**, in particolare a bassa profondità (elevata planarità del fondo foro).
- Verifica sperimentale delle Funzioni di Influenza.