

AIAS 2009



Dipartimento di Meccanica
Politecnico di Torino

XXXVIII Convegno Nazionale - Torino, 9-11 Settembre 2009

AIAS 2009 - 047

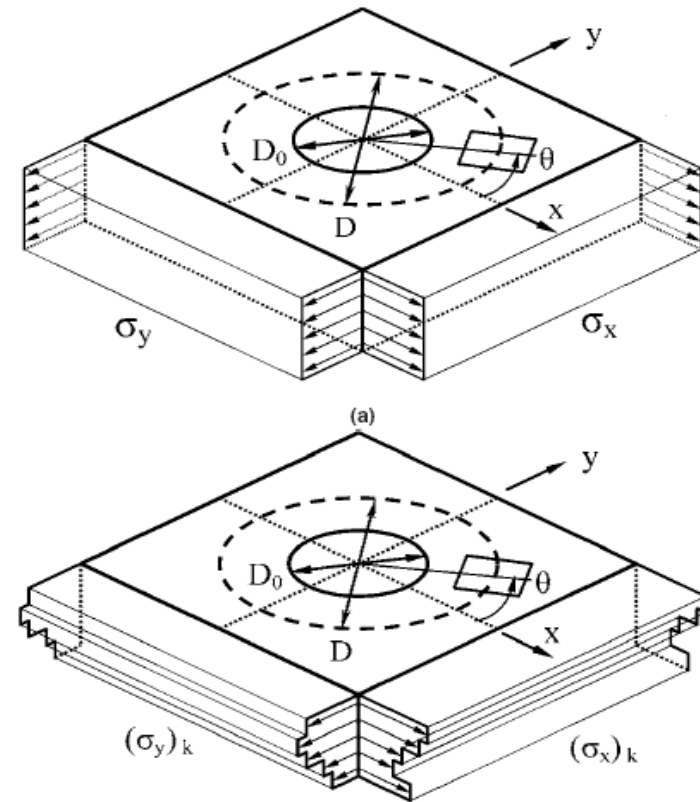
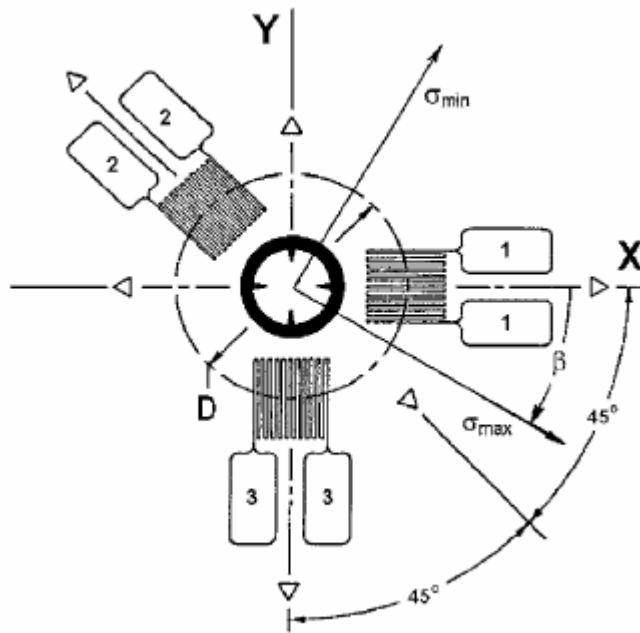
VALUTAZIONE DI TENSIONI RESIDUE ELEVATE CON IL METODO DEL FORO, CORREZIONE DELL'EFFETTO DELLA PLASTICITÀ

M. Beghini, L. Bertini, C. Santus

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Pisa

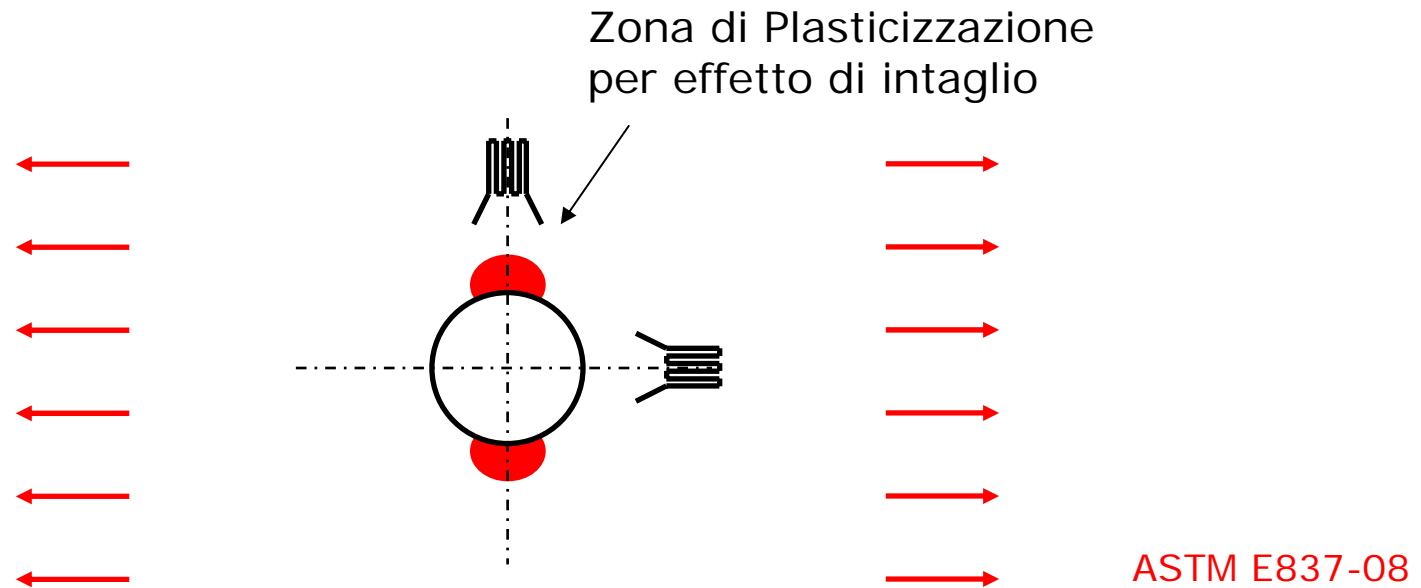


Metodo del foro



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

Effetto di plasticità



M. Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli, "Numerical Analysis of Plasticity Effects in the Hole-Drilling Residual Stress Measurement", *Journal of Testing and Evaluation*, 22(6), 522–529, 1994.

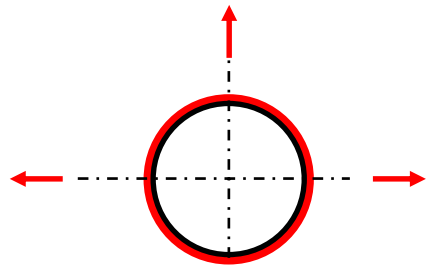
M. Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli. "An Account of Plasticity in the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement," *Journal of Strain Analysis*, Vol 30, No. 3, 1995.

M. Beghini, L. Bertini, "Recent advances in the hole drilling method for residual stress measurement", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7 (2), 163–172, 1998.

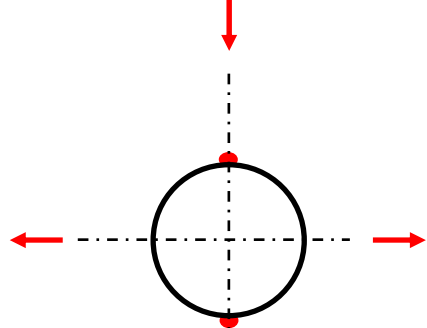
J. Gibmeier, J.P. Nobre, B. Scholtes, "Residual Stress Determination by the Hole Drilling Method in the Case of Highly Stressed Surface Layers", *Materials Science Research International*, 10 (1), 21–25, 2004.

Limite di validità della misura per effetto di plasticità

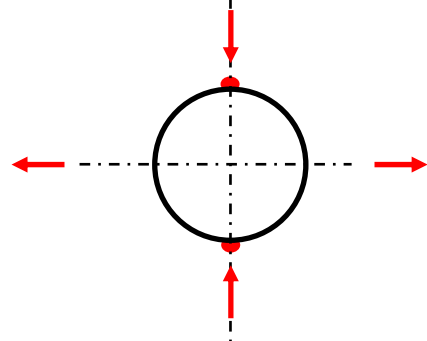
Soluzione di Kirsch: lastra forata piccolo spessore,
sottoposta a tensioni membranali



$$\sigma_y = \sigma_x \text{ (incipiente plasticizzazione)} = \frac{1}{2} \sigma_Y$$

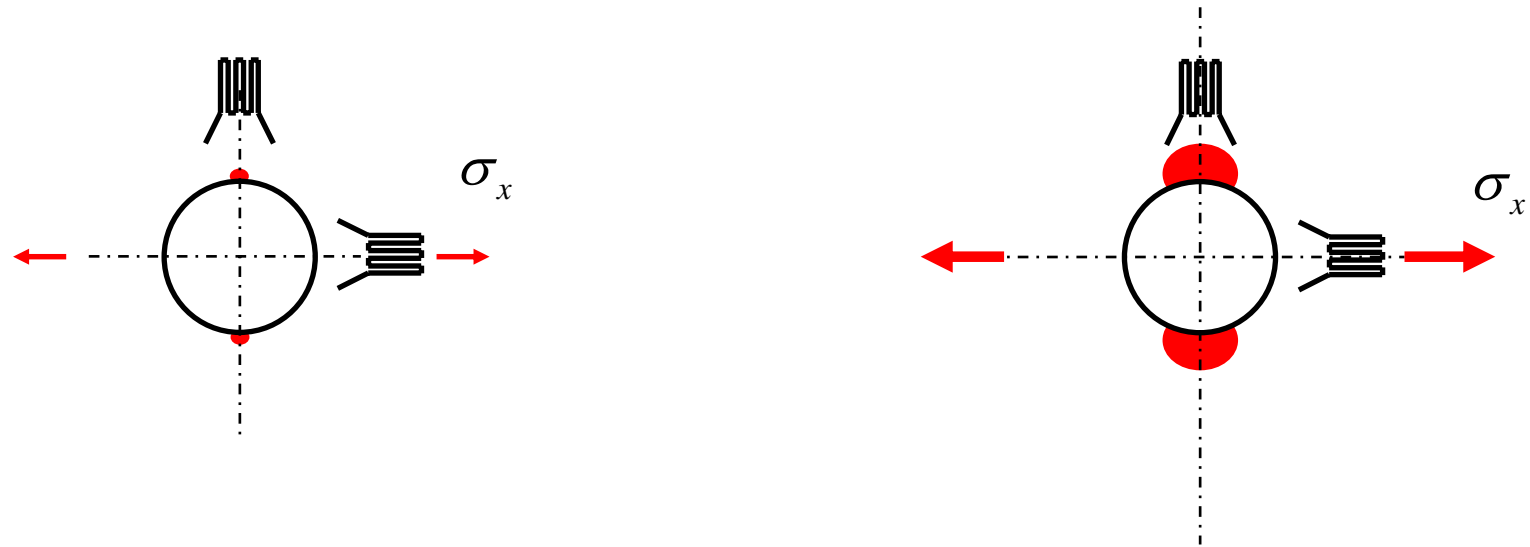


$$\sigma_x \text{ (incipiente plasticizzazione)} = \frac{1}{3} \sigma_Y$$



$$\sigma_x \text{ (incipiente plasticizzazione)} = \frac{1}{4} \sigma_Y$$

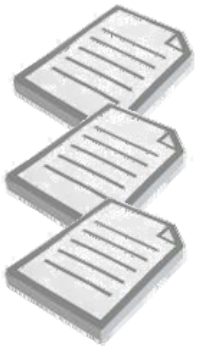
Limite di validità della misura per effetto di plasticità



σ_x (*incipiente plasticizzazione*) $<$ σ_x (*significativa perturbazione della misura*)

Obiettivo del lavoro:

- **Analisi dell'effetto della plasticità**
- **Procedura di correzione**



M. Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli, "Numerical Analysis of Plasticity Effects in the Hole- Drilling Residual Stress Measurement", *Journal of Testing and Evaluation*, 22(6), 522–529, 1994.

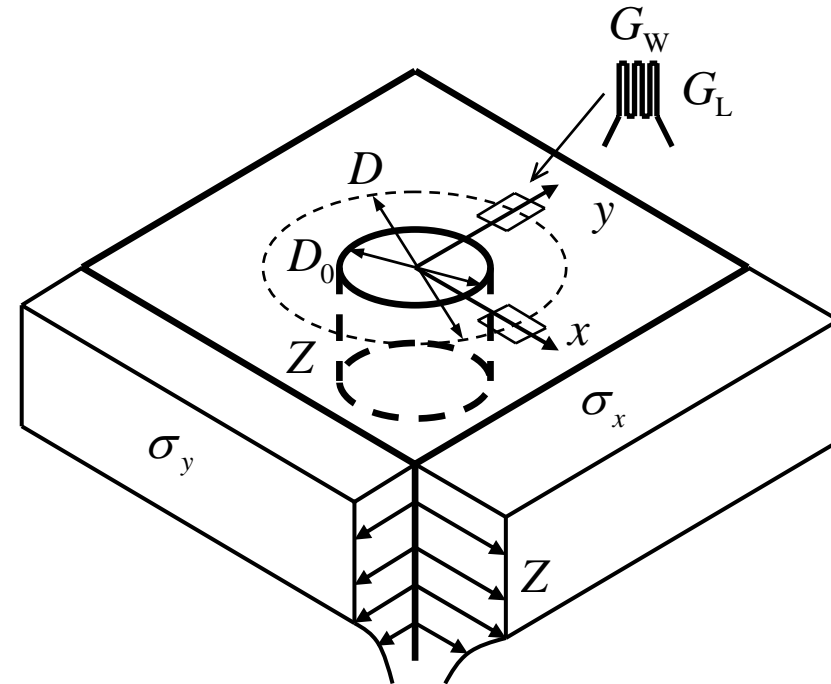
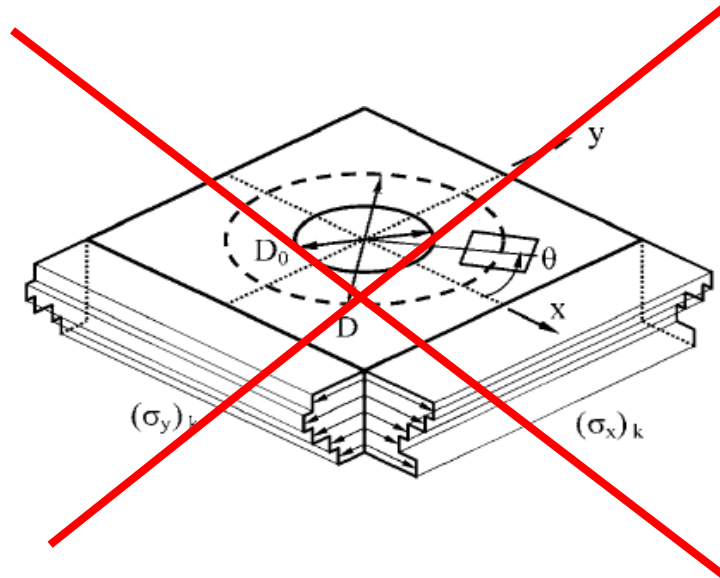
M. Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli, "An Account of Plasticity in the Hole-Drilling Method of Residual Stress Measurement," *Journal of Strain Analysis*, Vol 30, No. 3, 1995.

M. Beghini, L. Bertini, "Recent advances in the hole drilling method for residual stress measurement", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7 (2), 163–172, 1998.

Elementi di novità rispetto ai precedenti lavori:

- **Migliore modello EF.**
- **Matematica della procedura semplificata.**
- **Studio esteso a **fori di bassa profondità.****

Non applicabilità del principio di sovrapposizione



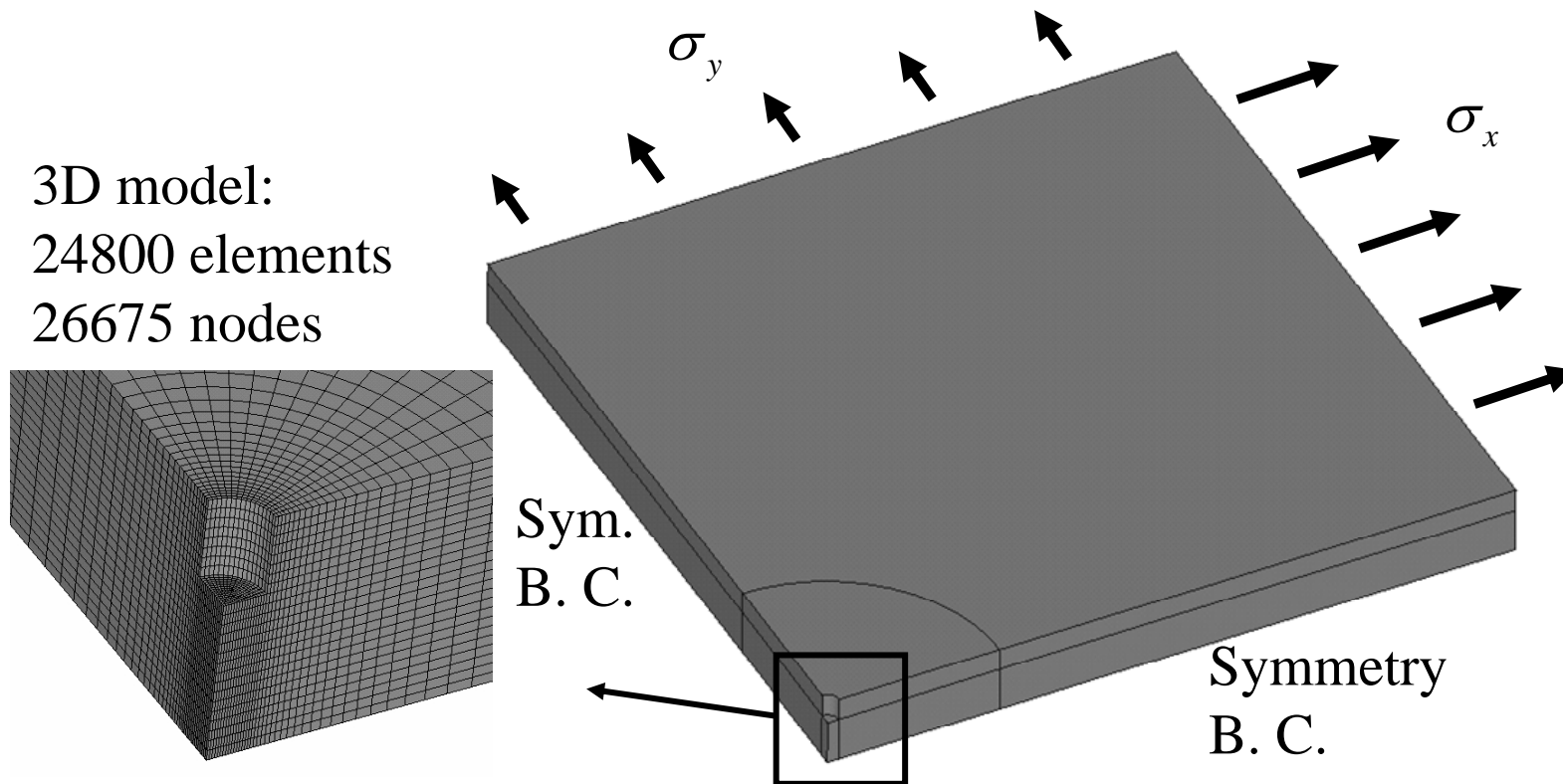
Tensione uniforme per tutta la profondità del foro

Deformazioni rilassate lungo le direzioni principali di tensione residua

Rosette investigate

Rosetta		Diametro medio	Lungh. griglia	Largh. griglia
ASTM A	Vishay 062RE	5.13	1.59	1.59
ASTM B	Vishay 062UM	5.13	1.59	1.14
HBM 1	HBM RY21	10.2	3.0	2.5
HBM 2	HBM RY61K(S)	5.10	1.50	0.70
HBM 3	HBM RY61R	5.10	1.50	0.72

Modello Elementi Finiti

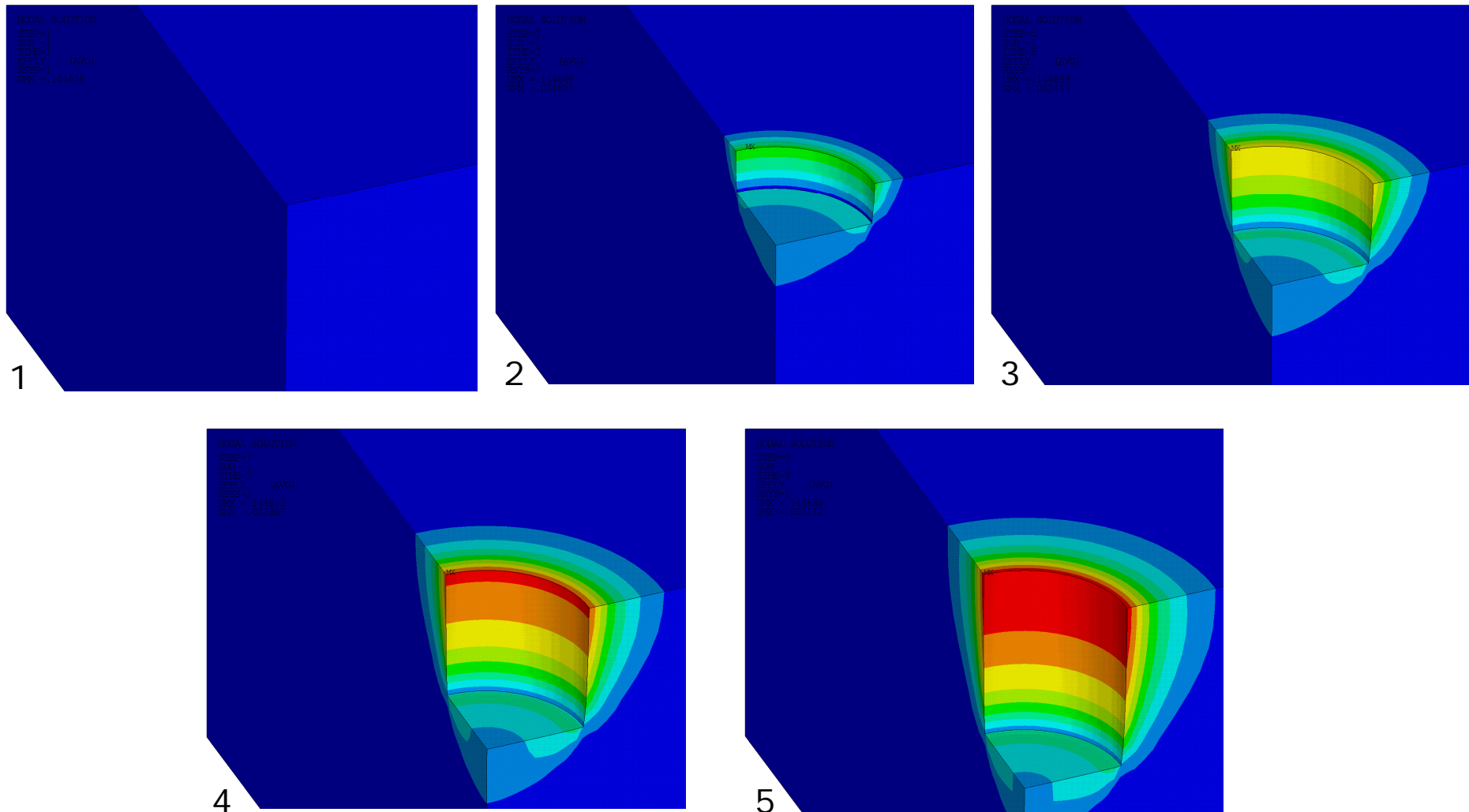


- Validazione della distribuzione di elementi nel piano
(riferimento: Kirsch)
- Validazione della distr. di elem. lungo la profondità
(rif. soluzione molto accurata, modello armonico piano)

err. < 1%

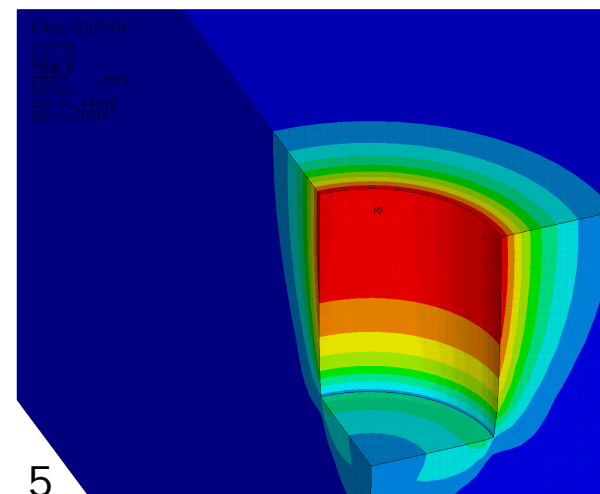
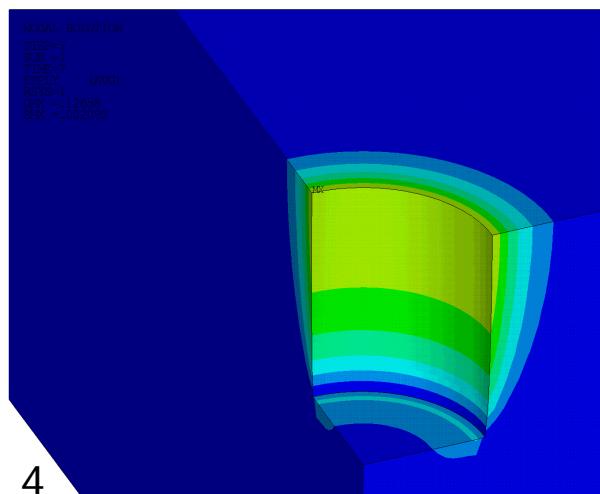
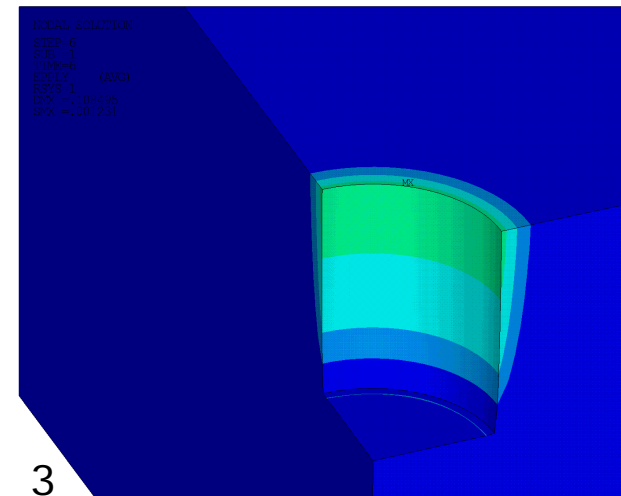
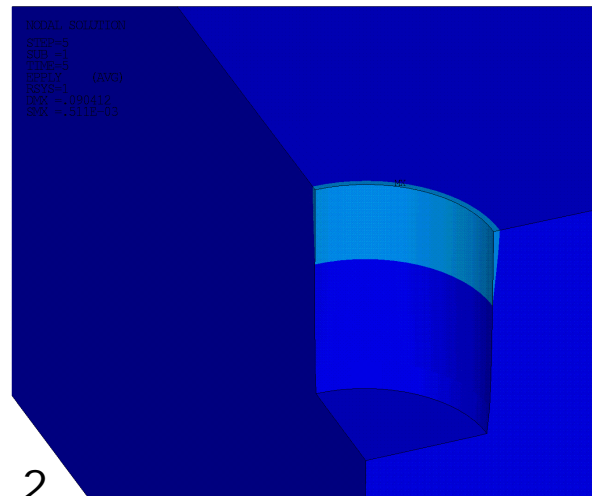
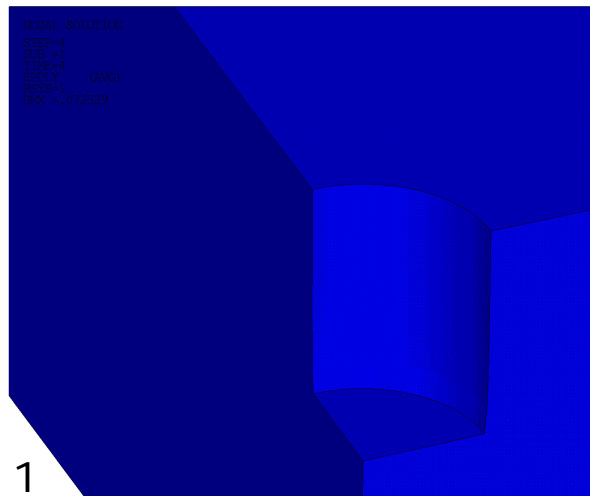
Dipendenza dalla sequenza carico/foro

Esecuzione del foro, tensioni residue già presenti
(riproduce **correttamente** l'esecuzione della misura)

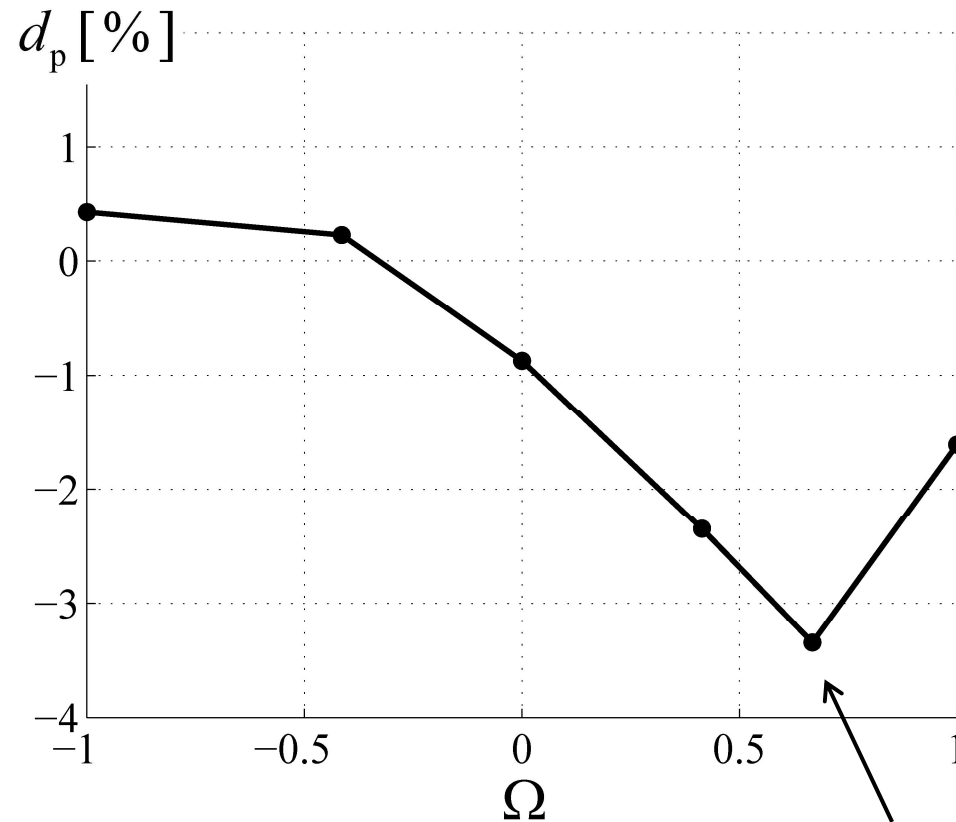


Dipendenza dalla sequenza carico/foro

Applicazione dello stato di tensione dopo aver eseguito il foro
(**semplice** in termini di modellazione EF)



Dipendenza dalla sequenza carico/foro



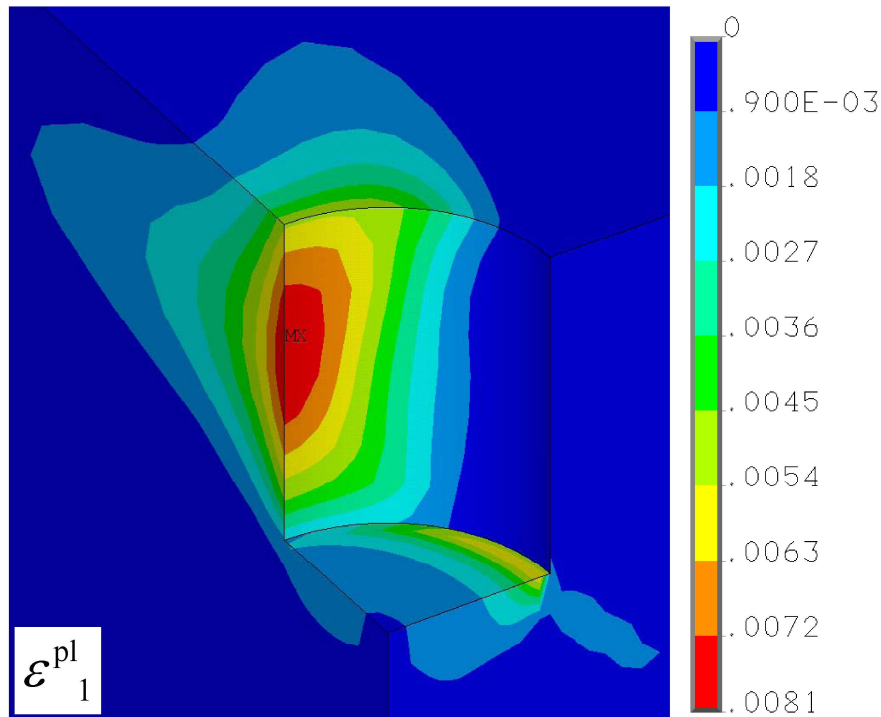
d_p (max) $\approx 3.5\%$

$\Omega = 0.668$

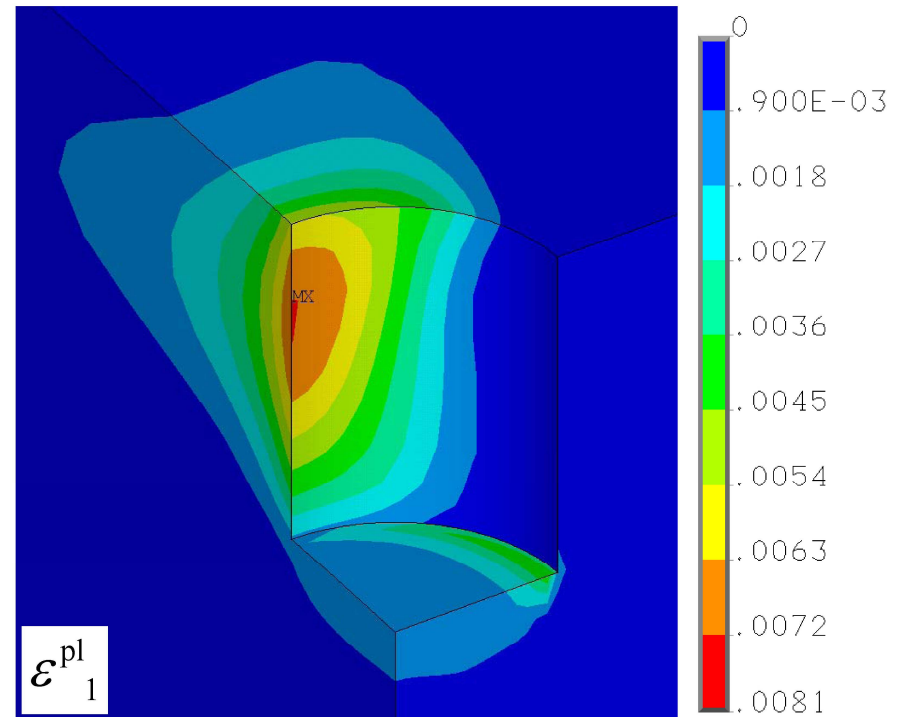
Dipendenza dalla sequenza carico/foro

$$d_p(\max) \approx 3.5\%$$

$$\Omega = 0.668$$



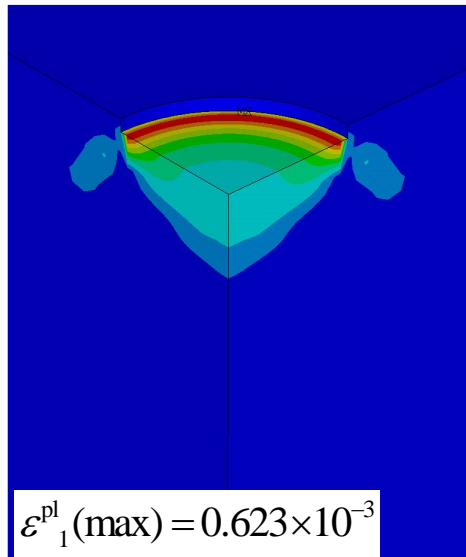
Tensione dopo
esecuzione del foro



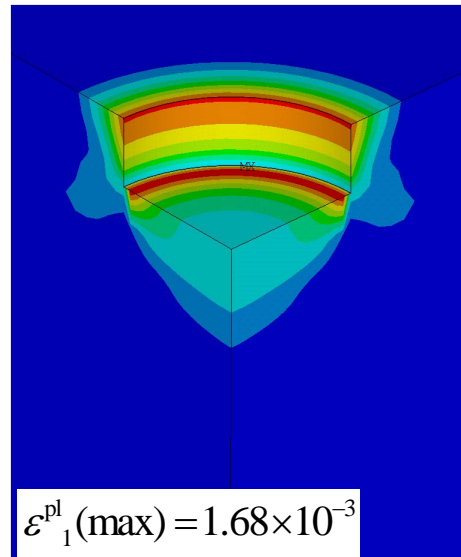
Foro dopo tensione
residua

Plasticità sub-superficiale

Plasticizzazione
superficie inferiore

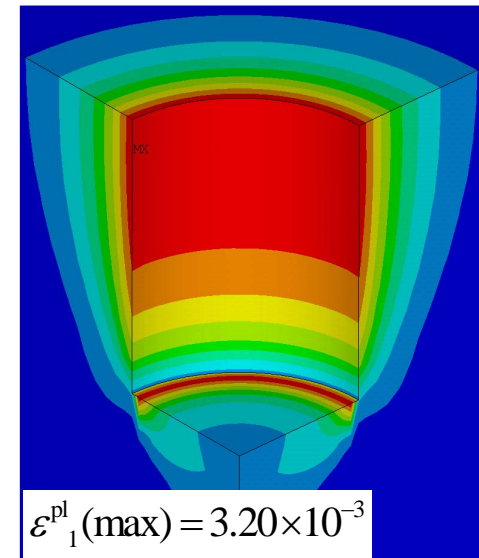


$$Z / D = 0.02$$



$$Z / D = 0.1$$

Soluzione simile a
Kirsch in superficie



$$Z / D = 0.4$$

Fattore di carico

$$f = \frac{\sigma_{\text{eq}} - \sigma_{\text{eq},i}}{\sigma_Y - \sigma_{\text{eq},i}},$$

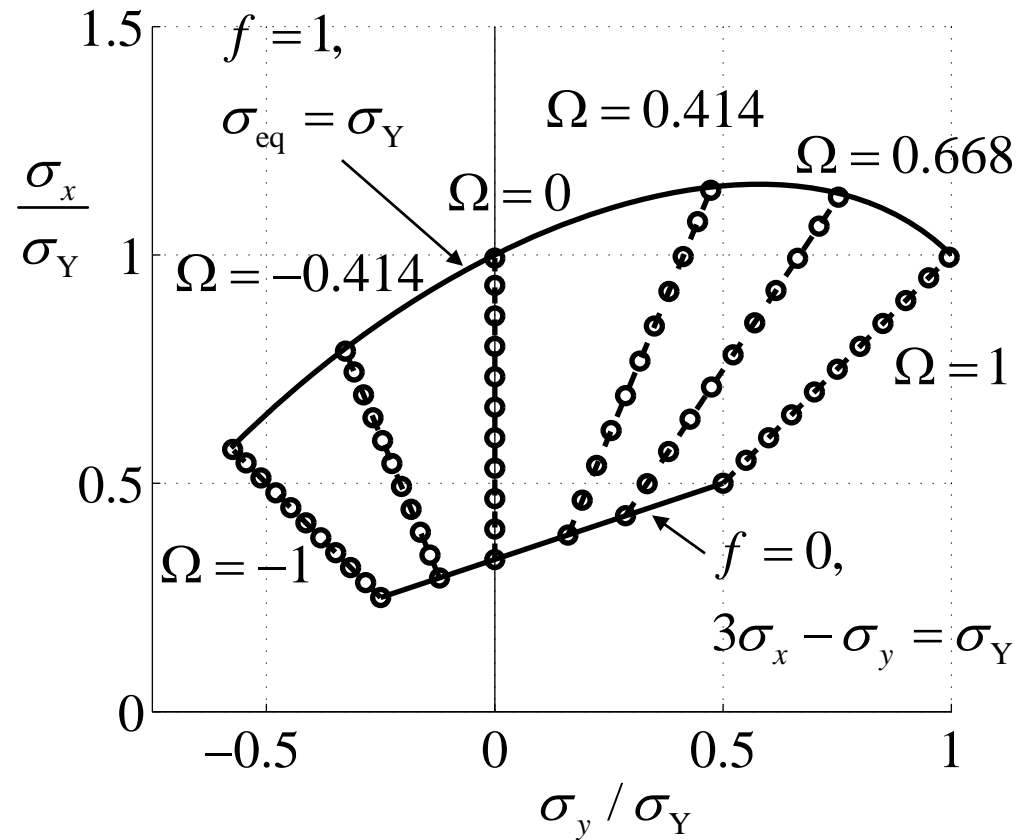
$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y}$$

$$\sigma_{\text{eq},i} = \sigma_Y \frac{\sqrt{1 - \Omega + \Omega^2}}{3 - \Omega} \quad (\text{Kirsch})$$

$f = 0$, no plasticità in superficie

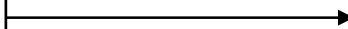
$f = 1$, plasticità diffusa (tens. residua al limite di snervamento)

Configurazioni investigate



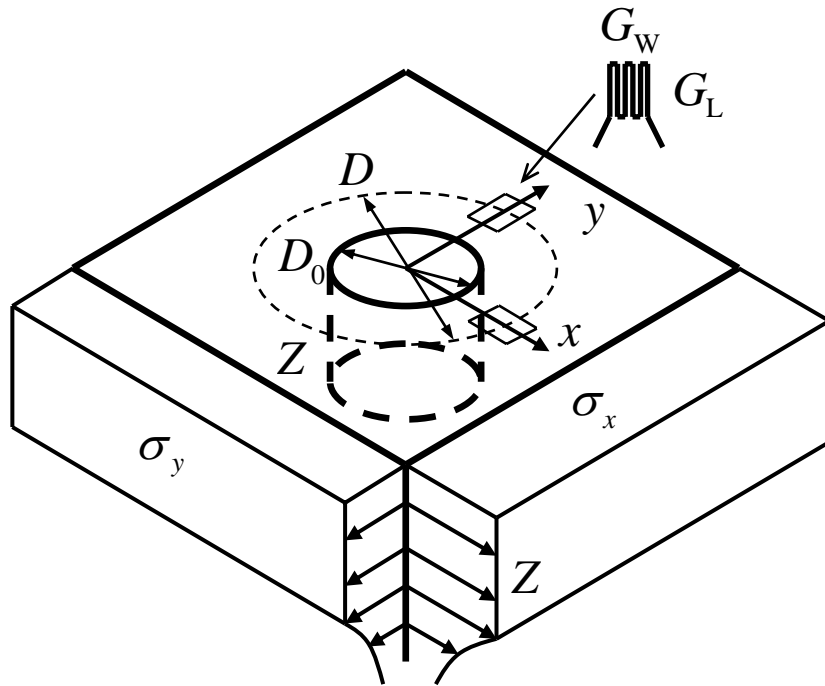
×5 rosette ×5 rapporti D0/D × 3 rapporti di incrudimento × 3 rapporti di profondità
= 14850 simulazioni ≈ 50 giorni di simulazione

**Output
simulazione**



**Deformazioni rilassate
griglie estensimetriche,
perturbate dall'effetto di
plasticità: $\bar{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_y$**

Coefficienti di calibrazione, tensioni residue “as elastic”



$$\sigma_{x,el} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} - \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b}$$

$$\sigma_{y,el} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} + \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b}$$

Fattore di carico, stimato (assumendo il materiale elastico)

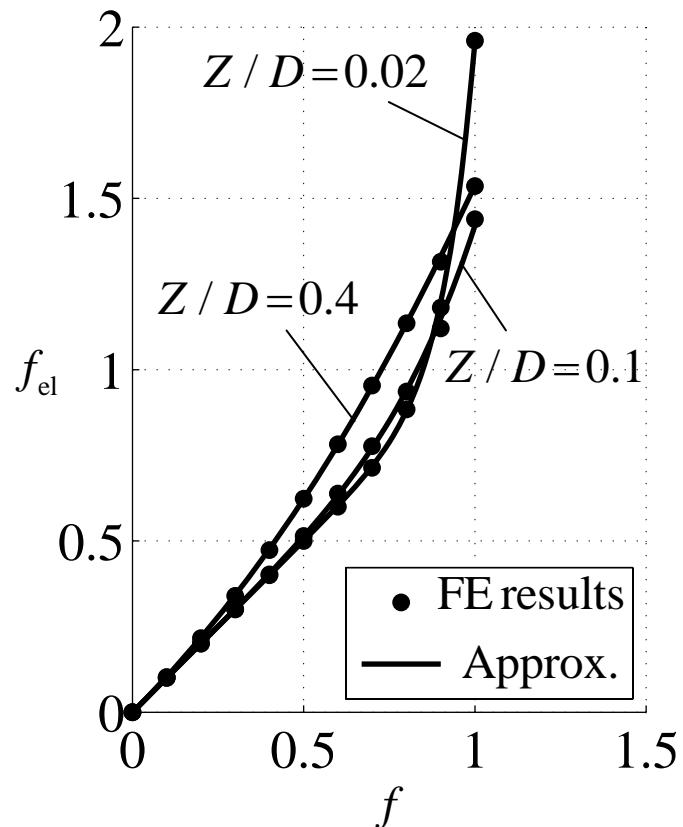
$$f_{\text{el}} = \frac{\sigma_{\text{eq,el}} - \sigma_{\text{eq,i}}}{\sigma_Y - \sigma_{\text{eq,i}}}$$

$$\sigma_{x,\text{el}} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} - \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b},$$

$$\sigma_{y,\text{el}} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} + \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b},$$

$$\sigma_{\text{eq,el}} = \sqrt{\sigma_{x,\text{el}}^2 + \sigma_{y,\text{el}}^2 - \sigma_{x,\text{el}}\sigma_{y,\text{el}}}$$

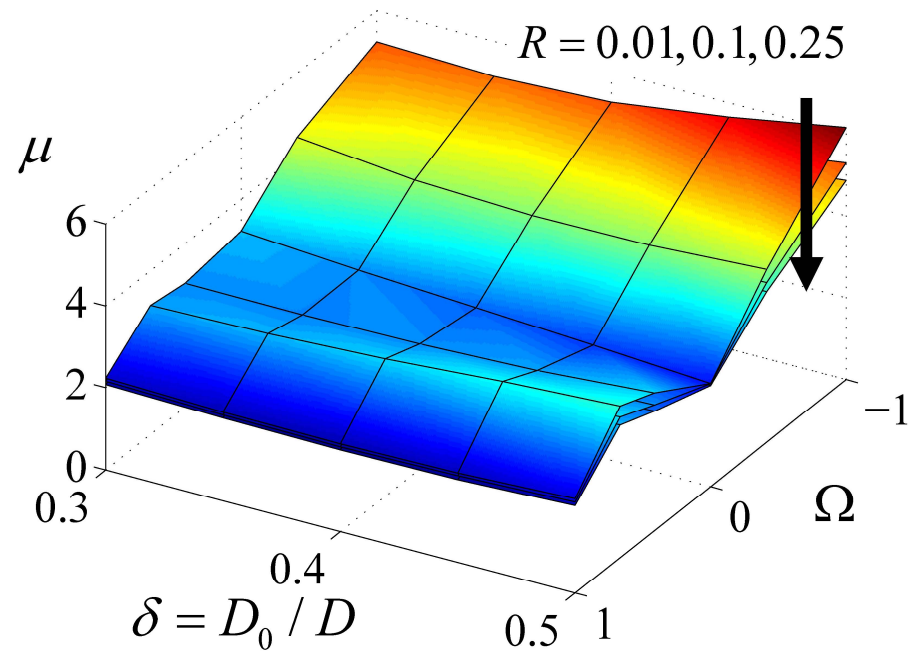
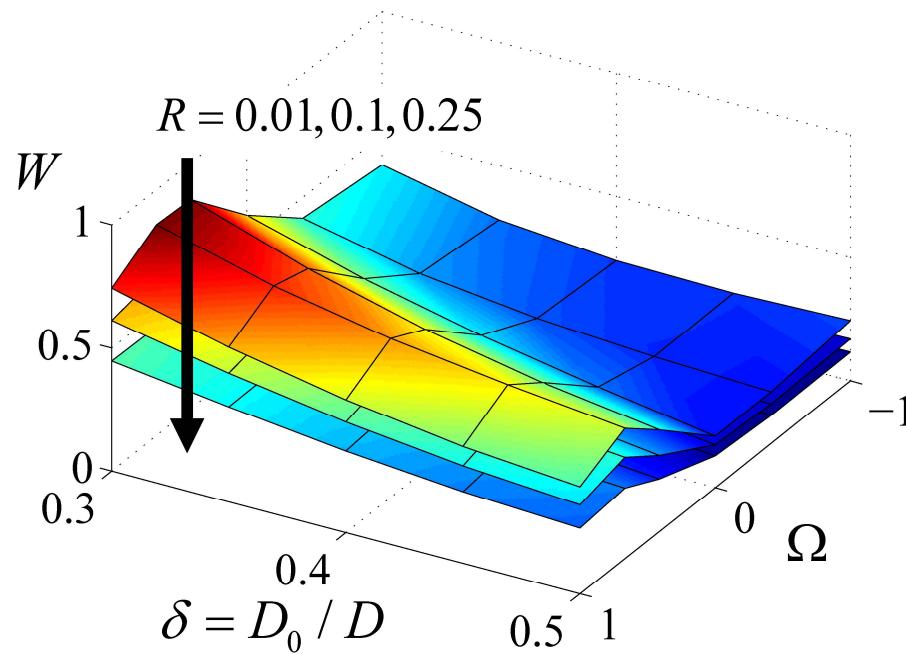
Relazione fra Fattore di carico e Fattore di carico stimato



$$f_{el} = f + W f^{\mu}$$

$$f_{el} \approx f, \quad f \ll 1 \text{ (es.: } f = 0.01\text{)}$$

Approssimazione dei coefficienti



$$W = w_1 \Omega^3 \delta^2 + w_2 \Omega^2 \delta^2 + w_3 \Omega \delta^2 + w_4 \delta^2 + w_5 \Omega^3 \delta + w_6 \Omega^2 \delta \\ + w_7 \Omega \delta + w_8 \delta + w_9 \Omega^3 + w_{10} \Omega^2 + w_{11} \Omega + w_{12}$$

$$\mu = m_1 \Omega^3 \delta^2 + m_2 \Omega^2 \delta^2 + m_3 \Omega \delta^2 + m_4 \delta^2 + m_5 \Omega^3 \delta + m_6 \Omega^2 \delta \\ + m_7 \Omega \delta + m_8 \delta + m_9 \Omega^3 + m_{10} \Omega^2 + m_{11} \Omega + m_{12}$$

Procedura di correzione 1/2

1. Incollare la rosetta estensimetrica sulla superficie, con le direzioni delle griglie ortogonali (griglie 1 e 3) orientate secondo le direzioni principali (note o presunte note) della tensione residua.
2. Eseguire il foro fino ad una profondità rispetto alla quale è lecito assumere tensione residua uniforme. Leggere le deformazioni rilassate.
3. Valutare le tensioni "elastiche" secondo i coefficienti di calibrazione:

$$\sigma_{x,el} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} - \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b}, \quad \sigma_{y,el} = -\frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2a(1+\nu)} + \frac{E(\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)}{2b}$$

4. Stimare il rapporto di biassilità:

$$\Omega \approx \frac{\sigma_{x,el}}{\sigma_{y,el}}$$

5. Determinare la tensione residua equivalente di inizio plasticizzazione, conoscendo il rap. di biass. e la tensione di snervamento del materiale.

$$\sigma_{eq,i} = \sigma_Y \frac{\sqrt{1-\Omega+\Omega^2}}{3-\Omega}$$

Procedura di correzione 2/2

7. Determinare il rapporto di carico "elastico"

$$f_{el} = (\sigma_{eq,el} - \sigma_{eq,i}) / (\sigma_Y - \sigma_{eq,i})$$

8. Determinare i coefficienti in funzione della geometria e del rapporto di biassialità:

$$W = w_1 \Omega^3 \delta^2 + w_2 \Omega^2 \delta^2 + w_3 \Omega \delta^2 + \dots; \quad \mu = m_1 \Omega^3 \delta^2 + m_2 \Omega^2 \delta^2 + m_3 \Omega \delta^2 + \dots$$

9. Ottenere il fattore di carico invertendo l'Eq.: (Newton-Raphson)

$$f_{el} = f + W f'' \rightarrow f$$

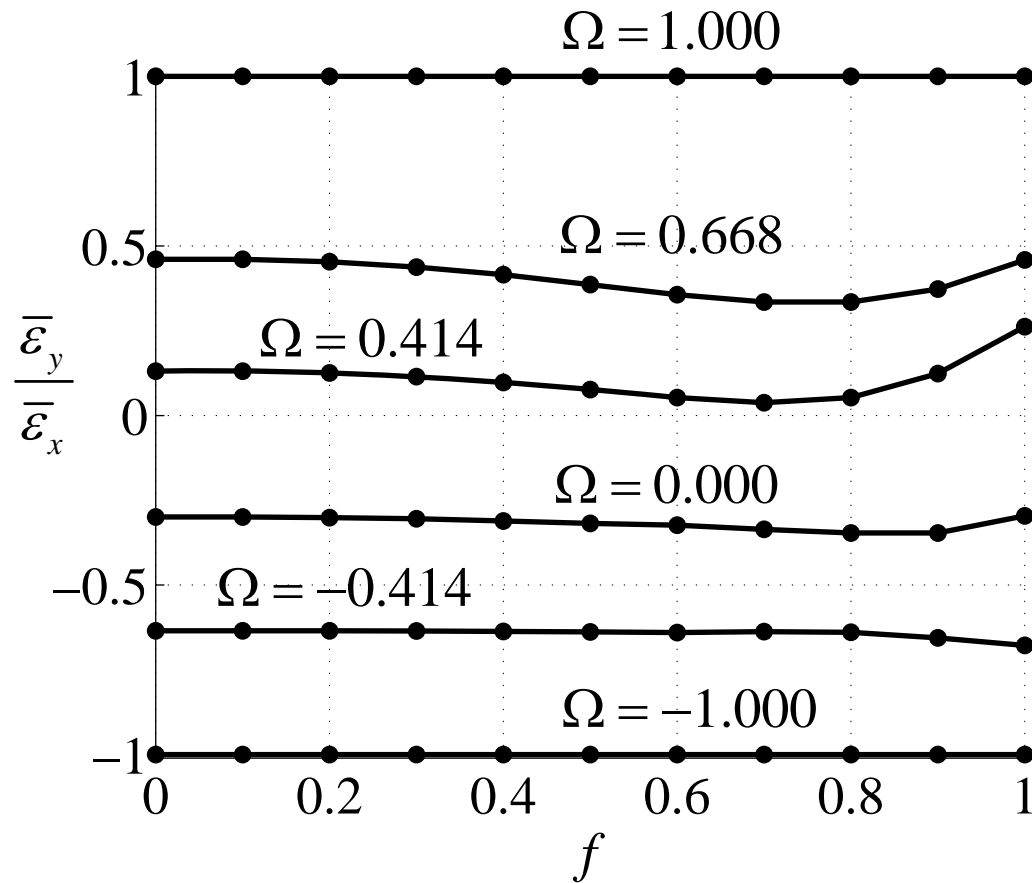
9. Stimare la tensione residua equivalente:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{eq,i} + f(\sigma_Y - \sigma_{eq,i})$$

10. Determinare le componenti principali:

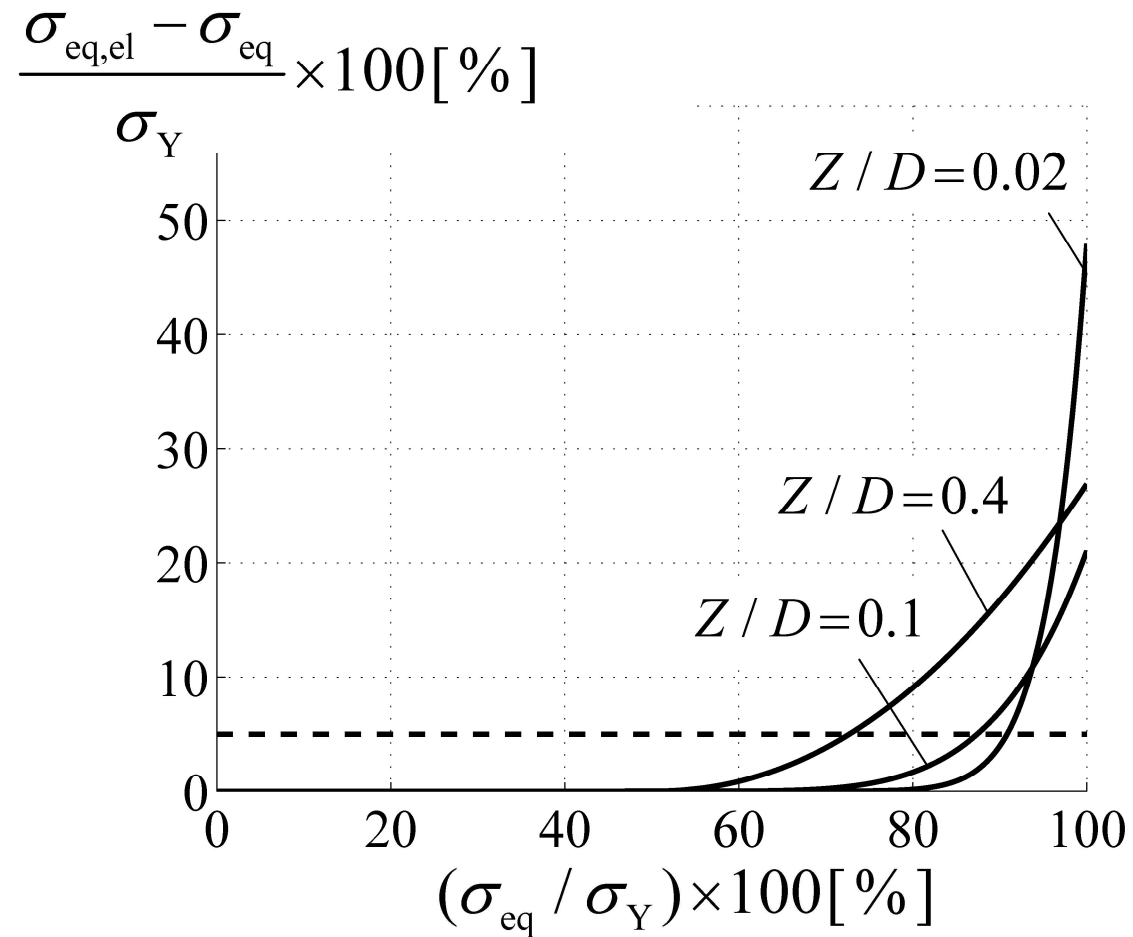
$$\sigma_x = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{1 - \Omega + \Omega^2}}, \quad \sigma_y = \Omega \sigma_x$$

Stima del rapporto di biassialità



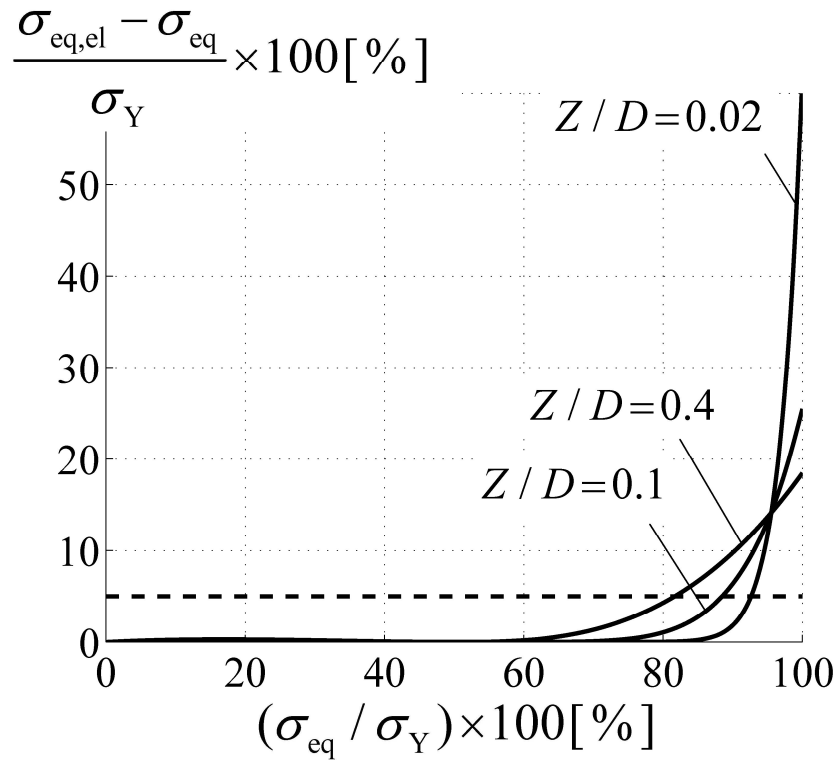
$$\Omega = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \approx \frac{\sigma_{x,el}}{\sigma_{y,el}}$$

Entità della correzione

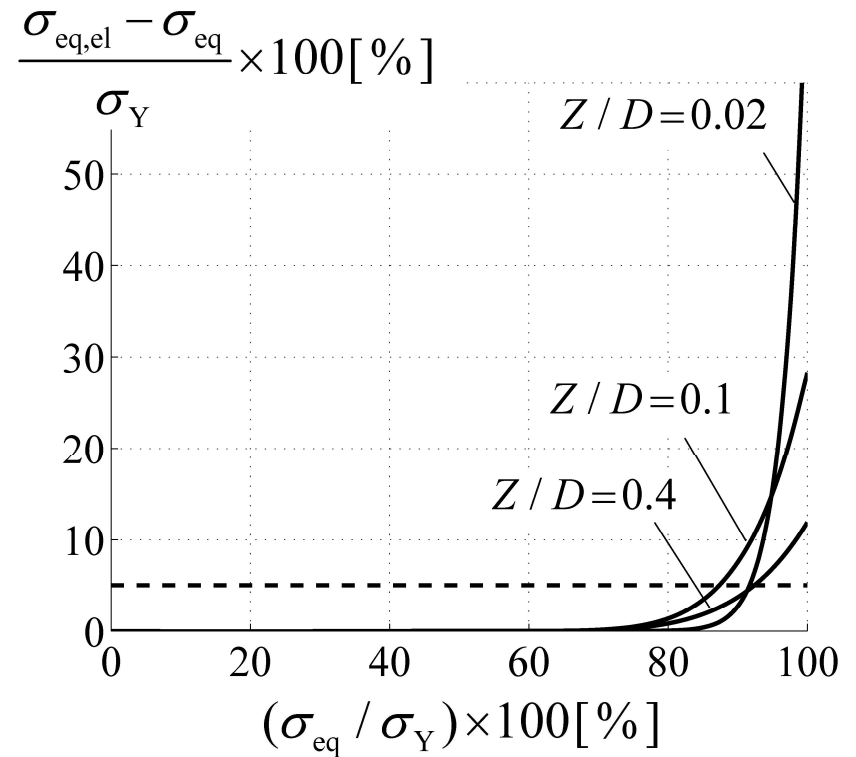


$\Omega = 1$ Equibiassiale

Entità della correzione



$\Omega = 0$ Monoassiale



$\Omega = -1$ Taglio

Sommario e Conclusioni

- **Modello Elementi Finiti per investigare l'effetto di plasticità sul metodo del foro.**
- **Bassa dipendenza** della sequenza carico/foro.
- **Procedura per la correzione dell'effetto di plasticità.**
- **Approssimazione di tensione uniforme, no eccentricità, necessità di conoscere le direzioni principali**
- **Procedura significativa solo per tensione residua elevata:**
 - foro bassa profondità, correzione raccomandata per tens. res. > **90%** limite di snervamento
 - foro profondo, correzione raccomandata per tens. res. > **70%** limite di snervamento