

VALIDAZIONE SPERIMENTALE DI UNA ROSETTA A 6 GRIGLIE PER RIDURRE L'ERRORE DI ECCENTRICITA' NELLA MISURA DELLE TENSIONI RESIDUE

M. Beghini^a, L. Bertini^a, C. Santus^{*a}, A. Benincasa^b, A. Bertelli^b, E. Valentini^b

^a *Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione, Università di Pisa.*

*Largo Lucio Lazzarino, n.2 – 56122 Pisa, *e-mail: ciro.santus@ing.unipi.it*

^b *SINT Technology srl, via Giusti, n. 229 – 50041 Calenzano (FI).*

Sommario

Il metodo del foro con la rosetta estensimetrica tipicamente utilizza rosette a 3 griglie di cui 2 perpendicolari fra loro e la terza inclinata di 45°. L'esecuzione del foro concentrico con la rosetta è soggetto ad un inevitabile errore di eccentricità che può comportare errori nella ricostruzione della distribuzione di tensioni residue. L'eccentricità può tuttavia essere misurata e corretta nella procedura analitica di calcolo delle tensioni residue. Il presente lavoro propone invece l'utilizzo di una rosetta innovativa a 6 griglie (diametralmente ripetute a quelle della comune rosetta a 3 griglie) che permette di compensare in modo sistematico l'errore di eccentricità, senza nessuna correzione analitica. In questo lavoro è stata eseguita la validazione sperimentale di tale rosetta, mediante un banco a flessione che permette di simulare una tensione residua nota. La compensazione della rosetta a 6 griglie ha dato esito positivo anche con un'eccentricità, intenzionalmente introdotta, fino a 0.2 – 0.3 mm.

Abstract

The hole drilling method is usually performed with rosette strain gages having three grids, two of them are perpendicular, while the other is at 45° with respect to the others. The drilled hole has to be perfectly concentric with the rosette center. The eccentricity can cause error in the evaluation of the residual stress distribution. However, the eccentricity components can be measured and then taken into account in the residual stress calculation procedure. Nevertheless, the present research introduces an innovative 6 grids rosette, designed to systematically correct the eccentricity error, without any further analytical correction. An experimental validation is proposed here, by means of a test rig to simulated a bending residual stress, in order to have a verification tool. The 6 grids rosette correction was successfully obtained even with an eccentricity (imposed with purpose) as high as 0.2 – 0.3 mm.

Parole chiave: Tensioni residue. Metodo del foro. Rosetta a 6 griglie.

1. INTRODUZIONE

Il metodo del foro con la rosetta estensimetrica è una tecnica di misura delle tensioni residue, recentemente sviluppata e perfezionata, di tipo semidistruttivo. I vantaggi di tale tecnica sono il relativo basso costo, la semplicità della procedura e dell'attrezzatura richiesta e la possibilità di eseguire prove su componenti in esercizio. Nonostante la difficoltà intrinseca di misurare le tensioni residue in un componente, la qualità della misura ottenibile con il metodo del foro è in molti casi più che sufficiente. Tuttavia, sono necessari vari accorgimenti per limitare gli effetti di errori di varia natura [1, 2]. Un aspetto degno di nota è l'inevitabile errore di eccentricità fra il foro e il centro della rosetta. Tipicamente il diametro del foro è circa 2 mm, mentre il diametro medio delle griglie della rosetta è 5.1 mm. La normativa ASTM [3] prescrive un margine di accettabilità dell'errore di eccentricità di $\pm 0.004D$ in cui D è il diametro medio della rosetta (diametro della circonferenza concentrica con la rosetta che passa per la mezzeria delle griglie). Essendo $D = 5.1$ mm (per le rosette

comunemente usate) la massima eccentricità non dovrebbe superare 0.02 mm. Tali valori sono ottenibili mediante l'impiego di accurate tecniche ottiche di allineamento dell'asse del mandrino rispetto al centro della rosetta. In alcuni casi si possono avere anche valori di eccentricità superiori (dell'ordine di 0.05mm); anche errori così contenuti possono introdurre degli effetti significativi (dell'ordine del 10%) sulla valutazione delle tensioni residue, se si assume l'ipotesi di concentricità fra foro e rosetta. L'errore connesso con l'eccentricità è di natura "proporzionale" [4] (mentre è "additivo" l'errore sulla stima delle tensioni residue dovuto ad incertezze di misura delle griglie estensimetriche) quindi in un certo senso più tollerabile dato che, per esempio, non può comportare un errore sul segno della tensione residua. L'errore di eccentricità è tuttavia degno di attenzione. L'eccentricità del foro può non essere considerata banalmente come un errore, ma introdotta come un parametro geometrico nella procedura analitica, per dedurre le tensioni residue dalle deformazioni rilassate, purché il metodo di interpretazione preveda tale accorgimento [5, 6, 7] e siano misurate le componenti di eccentricità del foro con accuratezza. La correzione analitica dell'eccentricità è facilmente implementabile mediante la tecnica numerica che utilizza le funzioni di influenza (Influence Functions, IFs), mentre invece non è facilmente implementabile mediante il metodo integrale con i coefficienti di calibrazione, come suggerito dalla norma ASTM [3].

Nel presente lavoro si propone invece una rosetta a 6 griglie in cui si ottiene una sistematica compensazione dell'effetto di eccentricità. L'effettiva compensazione della rosetta a 6 rami è l'oggetto del presente lavoro. Al fine di ottenere una validazione sperimentale si è utilizzato un banco a flessione in cui è possibile applicare e rimuovere il carico flettente, noto con accuratezza, simulando quindi la presenza di una tensione residua di flessione, che deve essere riprodotta dal metodo [8, 9]. L'esito positivo della riproduzione della tensione residua di flessione simulata dimostra l'effettiva capacità della rosetta a 6 rami di eseguire una compensazione dell'errore di eccentricità.

1. ROSETTA A 6 GRIGLIE

La Fig.1 mostra una prima realizzazione della rosetta a 6 griglie oggetto del presente studio. Lo schema è simile alle rosette classiche a 3 griglie, solo che per ciascuna griglia c'è un'altra griglia in posizione diametralmente opposta.

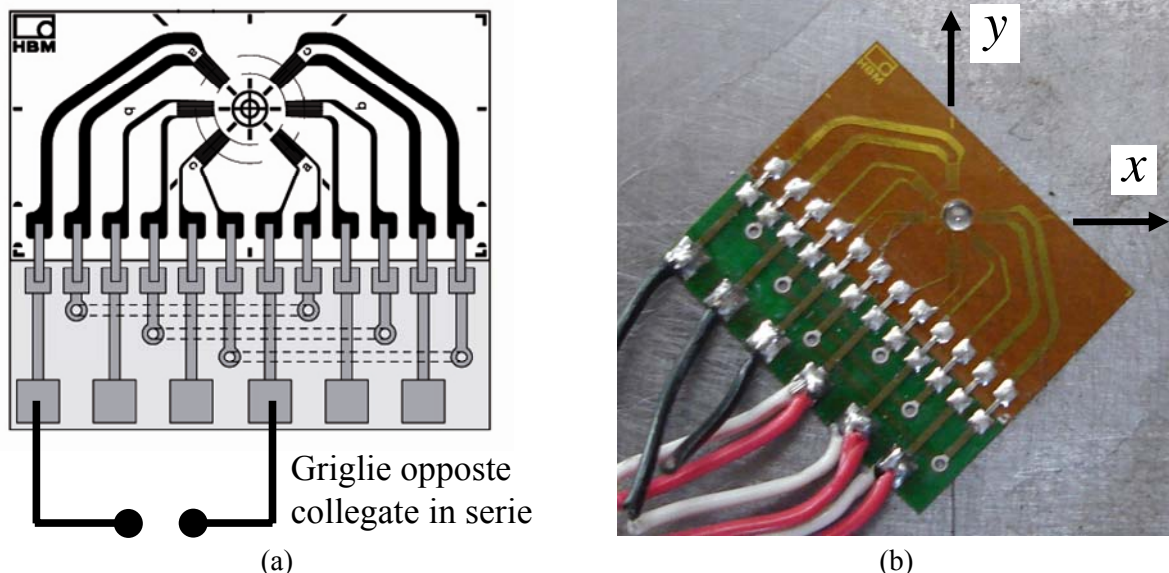


Figura 1. (a) Rosetta a 6 griglie, collegamento in serie delle griglie opposte. (b) Cablaggio e esecuzione di un foro intenzionalmente eccentrico, diametro del foro tipico di circa 1.8 mm.

La rosetta a 6 griglie non è definibile né come rosetta di tipo A né come rosetta di tipo B, secondo la norma ASTM [3], dal momento che le griglie stanno sia su un quadrante sia sul quadrante opposto. Infatti, la classificazione di rosetta di tipo A, piuttosto che di tipo B non ha nessun effetto nella procedura analitica di valutazione delle tensioni residue se non viene considerata l'eccentricità.

Usando una rosetta a 6 griglie l'eccentricità non deve essere introdotta nella procedura di calcolo delle tensioni dato che tale rosetta è *autocompensante*, come appunto si vuole verificare nel presente lavoro. Ciascuna griglia è collegata in serie con la rispettiva griglia opposta, Fig.1(a). La resistenza complessiva del ramo è quindi la somma della resistenza delle due griglie diametralmente opposte, così come la variazione di resistenza complessiva, per effetto della deformazione, è la somma delle variazioni delle due griglie opposte. L'effetto compensante, è dovuto al fatto che se il foro non è perfettamente concentrico, presa una qualunque delle 3 direzioni di misura ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$), la griglia più vicina al foro misura una deformazione più elevata (in modulo), rispetto a quanto avrebbe misurato se il foro fosse stato concentrico, mentre la griglia diametralmente opposta misura una deformazione inferiore. La variazione di resistenza è inferiore su una griglia, ma superiore sull'altra, mentre la somma si compensa, riproducendo una misura all'incirca pari quello che si avrebbe con una sola griglia se il foro fosse concentrico [7]. Pertanto la rosetta a 6 griglie si collega al sistema di acquisizione in modo del tutto simile alla classica rosetta a 3 griglie. La rosetta a 6 griglie è perfettamente compensante nell'ipotesi che l'eccentricità abbia solo un effetto del primo ordine sulla singola misura estensimetrica. In tal caso, un'eccentricità in direzione perpendicolare alla griglia produrrebbe una variazione nulla, mentre un'eccentricità con direzione parallela griglia produrrebbe una variazione di entità lineare alla componente di eccentricità secondo tale direzione. Questa ipotesi, è valida solo per valori di eccentricità piccoli, mentre è già limitata ad un fattore 1/2 per valori di eccentricità più elevati [7]. Le rosette a 6 rami usate nel presente lavoro hanno un diametro medio di 5.1 mm, e sono adatte per frese di 1.8 mm, Fig.1(b).

2. BANCO DI FLESSIONE E PROCEDURA DI VALIDAZIONE

Un elemento critico nella misura con il metodo del foro è la difficile ripetibilità e la verifica della misura stessa. Recentemente, è stato proposto un banco di flessione che produce una distribuzione tensionale controllata e nota con elevata accuratezza, in modo da eseguire sia la misura dello stato di tensione residua e sia la sua contestuale validazione [8, 9]. Il banco di flessione produce uno stato di tensione monoassiale, con basso gradiente (confrontato con la ridotta profondità del foro rispetto allo spessore del provino) nota con elevata accuratezza, perché è possibile misurare la forza applicata all'estremità e quindi dedurre la tensione mediante la semplice equazione di flessione della trave. Il layout del banco di flessione è rappresentato in Fig.2.

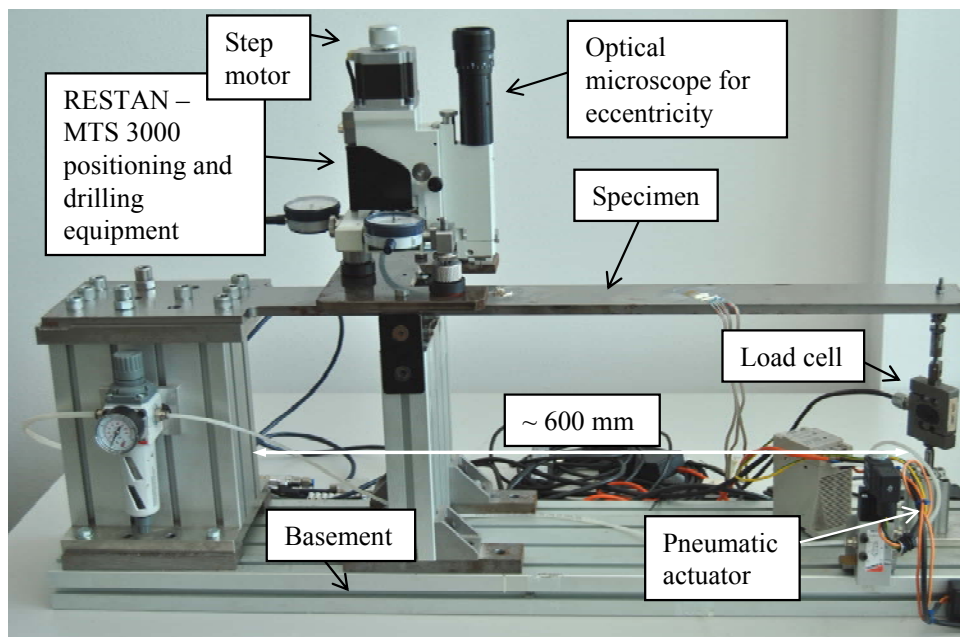


Figura 2. Banco prova per simulare uno stato di tensione residua di flessione, nota con accuratezza.

Il provino è costituito da una trave a sezione rettangolare, incastrata ad un'estremità sottoposta a flessione, da un carico applicato all'altra estremità, ottenuto mediante un attuttore pneumatico. La procedura di esecuzione della prova prevede di leggere le deformazioni estensimetriche ad ogni passo di avanzamento del foro, sia senza l'applicazione del carico di flessione, sia con il carico di flessione applicato. Eseguendo questa procedura si determinano due matrici di deformazioni rilassate [8, 9]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j) &= \varepsilon_i(z_j) \\ \varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j) &= \varepsilon_i^F(z_j) - \varepsilon_i(z_j) - \varepsilon_i^F(0)\end{aligned}\quad (1)$$

$\varepsilon_i(z_j)$ è la deformazione rilassata letta, dalla generica griglia $i=1,2,3$, all'incremento di profondità del foro j , quindi alla profondità del foro z_j , senza l'applicazione del carico. $\varepsilon_i^F(z_j)$ è invece la deformazione letta dalla generica griglia quando è applicata la forza F che produce flessione. $\varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j)$ sono le deformazioni rilassate dovute alle componenti di tensione residua, inevitabilmente presenti nella barra, che semplicemente coincidono con $\varepsilon_i(z_j)$ qualora le griglie siano state azzerate prima dell'esecuzione del foro. Infine, $\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j)$ sono le deformazioni rilassate dovute *soltanto* alla flessione, avendo disaccoppiato la flessione dalla tensione residua, come riportato nell'Eq.1. La necessità di sottrarre $\varepsilon_i^F(0)$, ossia la deformazione letta con carico applicato ma senza foro (oppure a profondità 0 del foro) deriva dal fatto che le deformazioni *rilassate* costituiscono la *variazione* di deformazione dovuta all'introduzione del foro stesso in un volume tensionato.

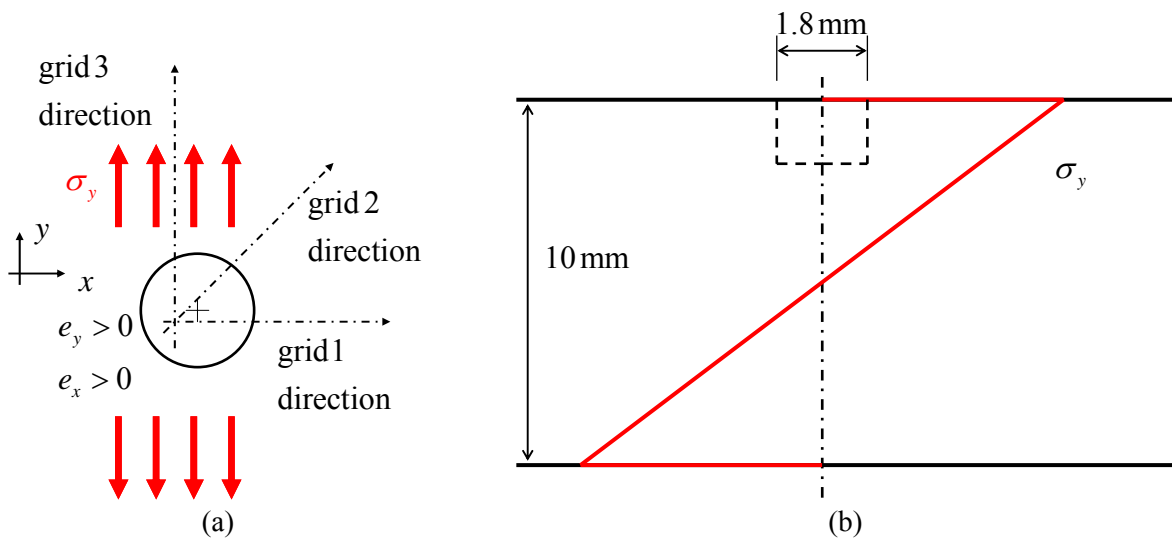


Figura 3. (a) Orientazione delle griglie rispetto al carico di flessione applicato. (b) Variabilità della tensione di flessione nella profondità, semplice andamento a farfalla, tensione massima nota con accuratezza.

Il tipico andamento delle deformazioni lette dalle griglie durante l'esecuzione di un ciclo di misura della prova con il banco a flessione è riportato nella Fig.4. Ciascun punto di acquisizione è la media di 15 campioni nel tempo di 0.45 s, quindi ad una frequenza di acquisizione di 33.3 Hz, non multipla della frequenza della rete elettrica di alimentazione. Durante l'applicazione del carico, le deformazioni lette sono relativamente elevate, in quanto non sono deformazioni rilassate come fatto notare in precedenza. Dopo aver eliminato la presenza del carico le deformazioni lette sono non nulle data l'inevitabile presenza di tensioni residue nella barra metallica utilizzata. Da notare di nuovo che la differenza fra le due deformazioni elimina l'effetto delle deformazioni rilassate dovute alla tensione residua sulle deformazioni rilassate di sola flessione. Inoltre, l'esecuzione della differenza elimina anche il problema della deriva delle letture estensimetriche (termica o dovuta ad altro) dato che un offset sullo zero agisce sia su $\varepsilon_i(z_j)$, sia su $\varepsilon_i^F(z_j)$, e la quantità di interesse è la differenza. La deriva

ha invece effetto sulle deformazioni rilassate per la determinazione delle tensioni residue, non di interesse però nel presente lavoro.

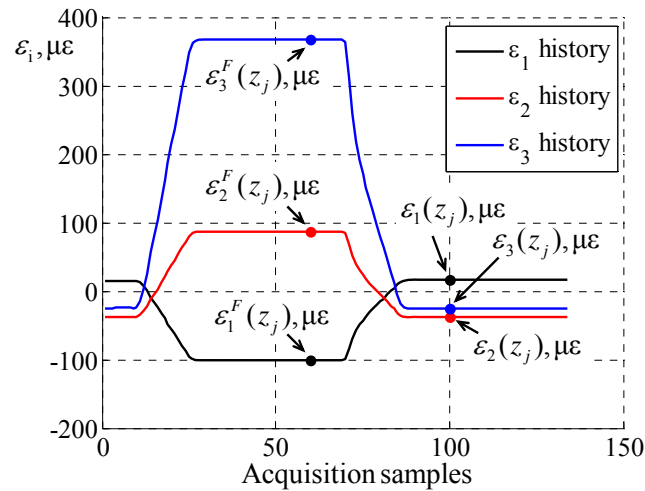


Figura 4. Ciclo di carico e scarico eseguito automaticamente dal banco di prova a flessione, ed acquisizione delle letture estensimetriche.

3. PROVE CON ROSETTE A 3 RAMI

Innanzitutto sono state eseguite alcune prove con comuni rosette a 3 griglie. Una prova con eccentricità secondo la direzione della sollecitazione (direzione y , vedi schema di Fig.3) e altre due con eccentricità secondo la direzione perpendicolare alla sollecitazione (direzione x).

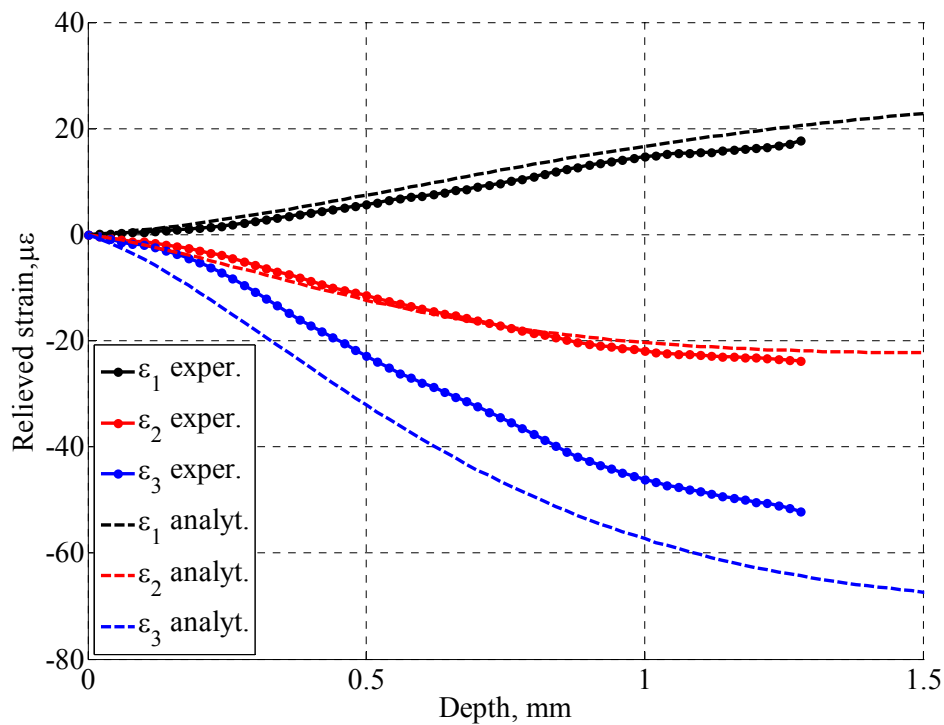


Fig.5(a)

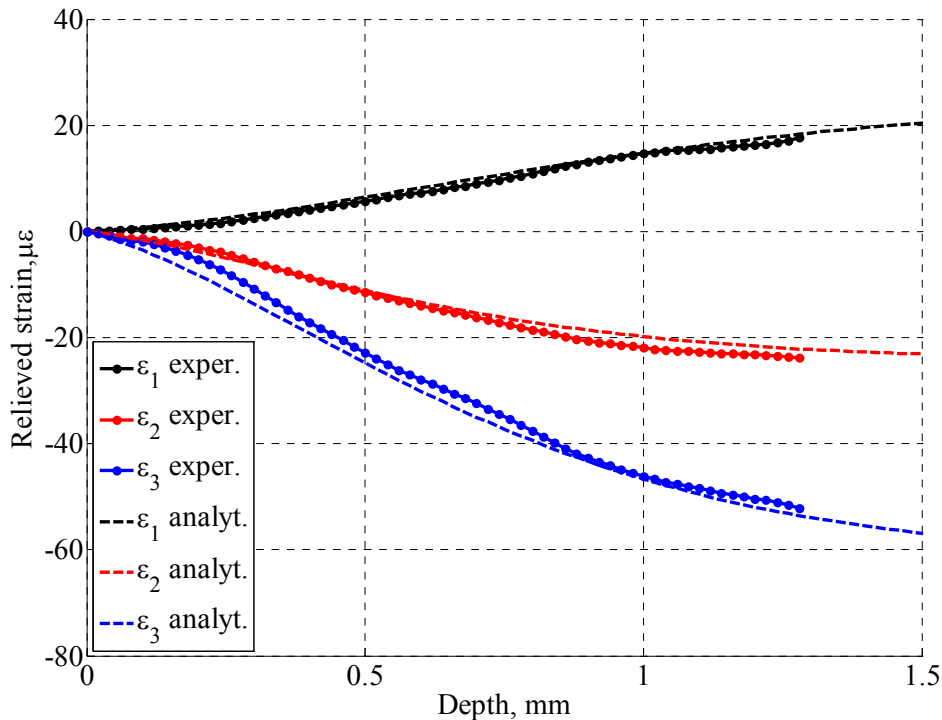


Fig.5(b)

Figura 5. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 3 rami eccentricità prevalente secondo la direzione del carico. (a) SENZA la correzione analitica di eccentricità. (b) CON la correzione analitica di eccentricità.

L'errore di eccentricità sulla rosetta a 3 griglie può essere corretto mediante la procedura analitica delle IFs proposta da Beghini et al. [6]. Tale procedura ha come obiettivo quello di determinare la distribuzione di tensione residua, ma permette di determinare anche le deformazioni rilassate alle varie profondità di foratura [10]. Infatti, le IFs sono delle funzioni *kernel* con le quali moltiplicare le componenti di tensione e ottenere le deformazioni rilassate per integrazione. L'utilizzo delle IFs ha come naturale applicazione la determinazione delle deformazioni rilassate (problema "diretto"). Successivamente si inverte il problema e si determina lo stato di tensione, assumendo una distribuzione dipendente linearmente da un numero finito di parametri (ad esempio una distribuzione lineare a tratti o costante a tratti) e si cercano quei parametri in modo tale che la deformazione rilassata ricostruita sia la migliore approssimazione, ai minimi quadrati, delle deformazioni rilassate sperimentali [6, 10]. Quindi, il modo migliore per verificare l'efficacia della correzione analitica dell'eccentricità, per rosette comuni a 3 rami, consiste semplicemente nel confrontare le deformazioni rilassate con quelle attese (essendo nota con accuratezza la tensione di flessione causa delle deformazioni rilassate), confrontando il risultato con e senza correzione di eccentricità.

In Fig.5 si mostra il confronto fra deformazioni rilassate sperimentali / attese per una rosetta a 3 rami con foro eccentrico e eccentricità prevalente secondo la direzione del carico: $e_x = -0.06$ mm, $e_y = -0.20$ mm, intendendo con segno (+) un'eccentricità del foro secondo il verso dell'asse corrispondente, come espresso dallo schema di Fig.3(a). La direzione x corrisponde alla griglia 1, mentre la direzione y (direzione del carico di flessione) alla griglia 3, infine la tipologia di griglia usata è quella di tipo B, secondo la normativa ASTM [3], ossia con le tre griglie sullo stesso quadrante. l'effetto della correzione è prevalente sul ramo 3, orientato secondo la direzione del carico, sia perché è quello più sensibile, essendo parallelo al carico, sia perché la componente di eccentricità prevalente è proprio secondo tale direzione. Essendo l'eccentricità negativa, la deformazione rilassata, calcolata senza correzione di eccentricità è maggiore (in modulo) di quanto ottenuto sperimentalmente dato che il foro è più lontano rispetto alla griglia.

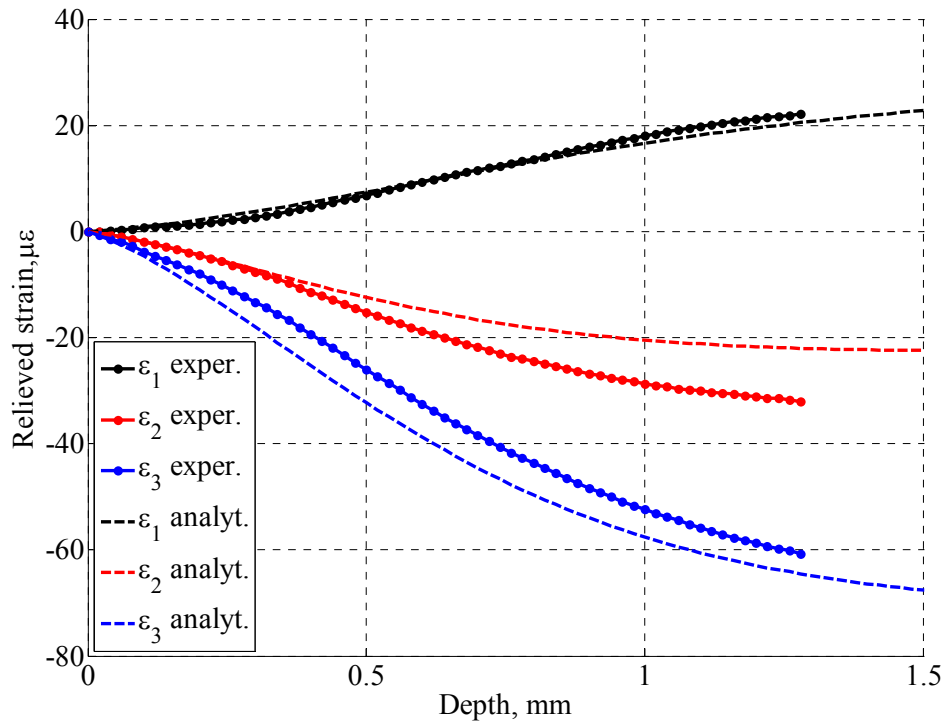


Fig.6(a)

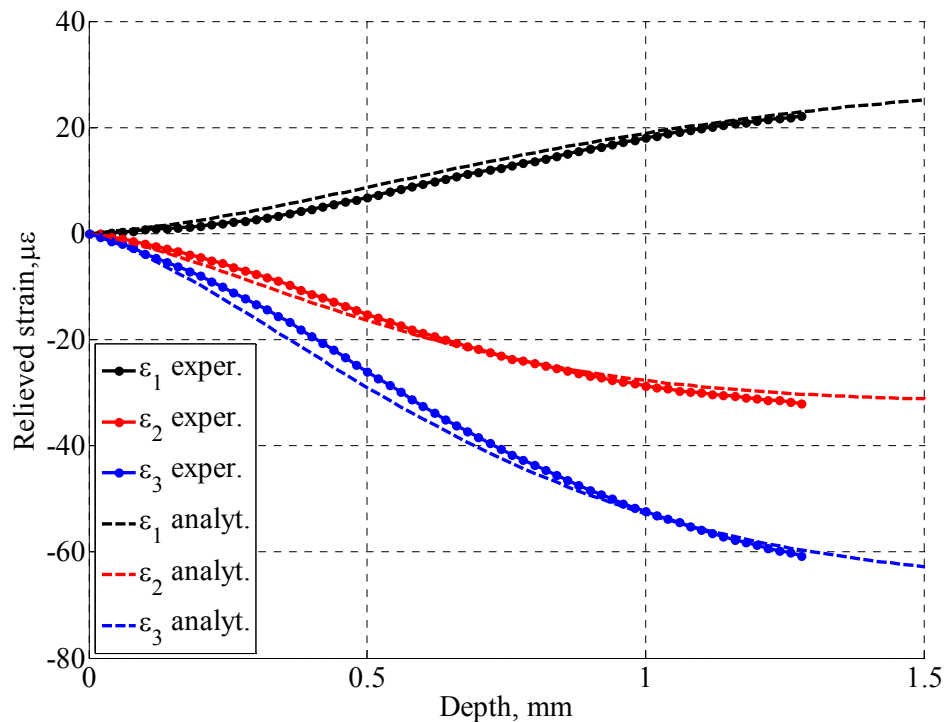


Fig.6(b)

Figura 6. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 3 rami, di tipo B, eccentricità prevalente secondo la direzione perpendicolare al carico. (a) SENZA la correzione analitica di eccentricità. (b) CON la correzione analitica di eccentricità.

In Fig.6 si mostra il confronto fra deformazioni rilassate sperimentali / attese per una rosetta a 3 rami con foro eccentrico e eccentricità prevalente secondo la direzione perpendicolare al carico: $e_x = 0.14 \text{ mm}$, $e_y = -0.07 \text{ mm}$. Analogamente al caso precedente l'effetto della correzione è evidente. In questo caso, il maggiore effetto di correzione si nota sulla griglia 2, inclinata a 45° , nonostante

l'eccentricità prevalente sia secondo l'asse x , tuttavia tale direzione non è molto sensibile essendo il carico nella direzione perpendicolare.

In Fig.7 si mostra il confronto fra deformazioni rilassate sperimentali / attese per una rosetta a 3 rami con foro eccentrico e eccentricità prevalente secondo la direzione perpendicolare al carico: $e_x = -0.22$ mm, $e_y = 0.03$ mm. Rispetto al caso precedente si tratta di una rosetta di tipo A, quindi la griglia a 45° si trova nel quadrante opposto rispetto alle altre due (Fig.3, "grid 2 direction" invertita).

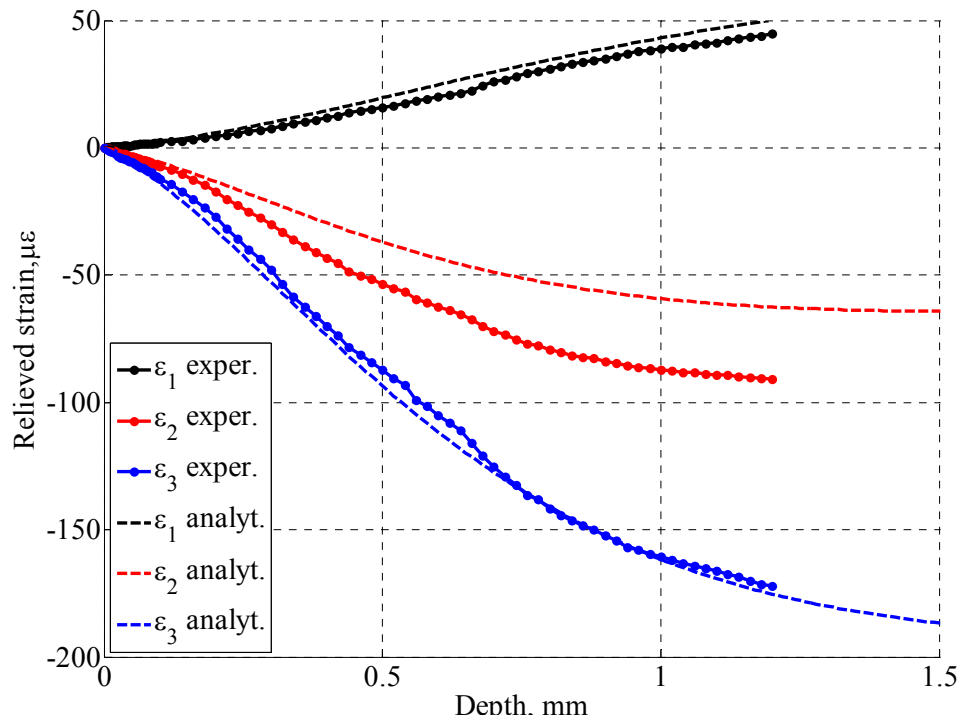


Fig.7(a)

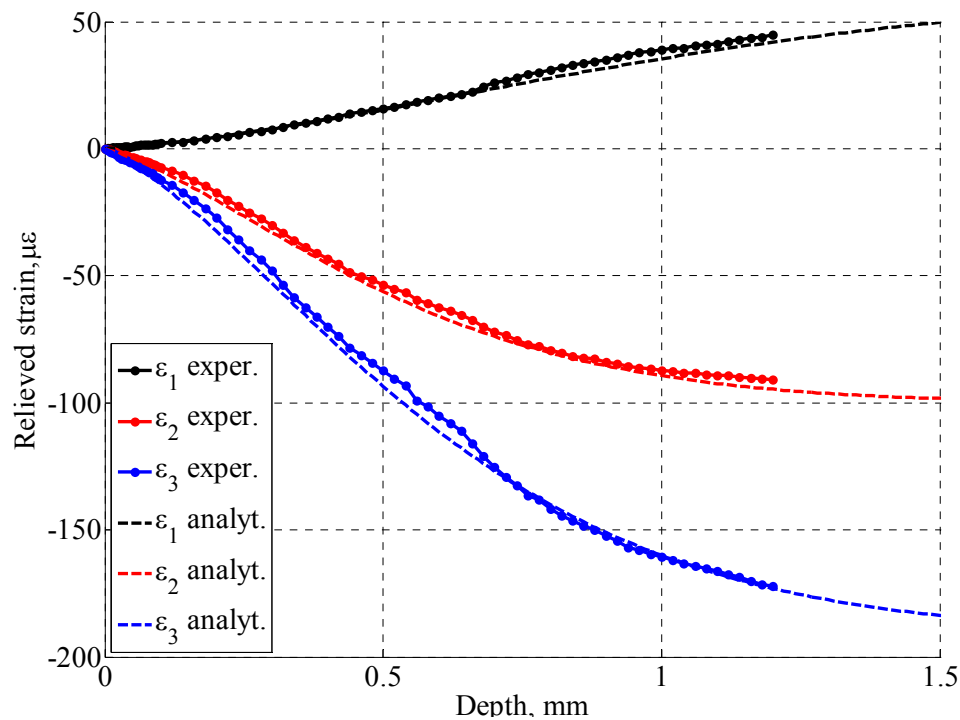


Fig.7(b)

Figura 7. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 3 rami, di tipo A, eccentricità prevalente secondo la direzione perpendicolare al carico. (a) SENZA la correzione analitica di eccentricità. (b) CON la correzione analitica di eccentricità.

4. PROVE CON ROSETTE A 6 RAMI

Sono state eseguite due prove con rosette a 6 rami. Una prova con eccentricità pressoché nulla, e una prova con eccentricità molto elevata. La Fig.8 mostra il confronto fra deformazioni rilassate attese e sperimentali, per la rosetta a 6 rami, per il caso di eccentricità molto bassa: $e_x = 0.03 \text{ mm}$, $e_y = -0.025 \text{ mm}$.

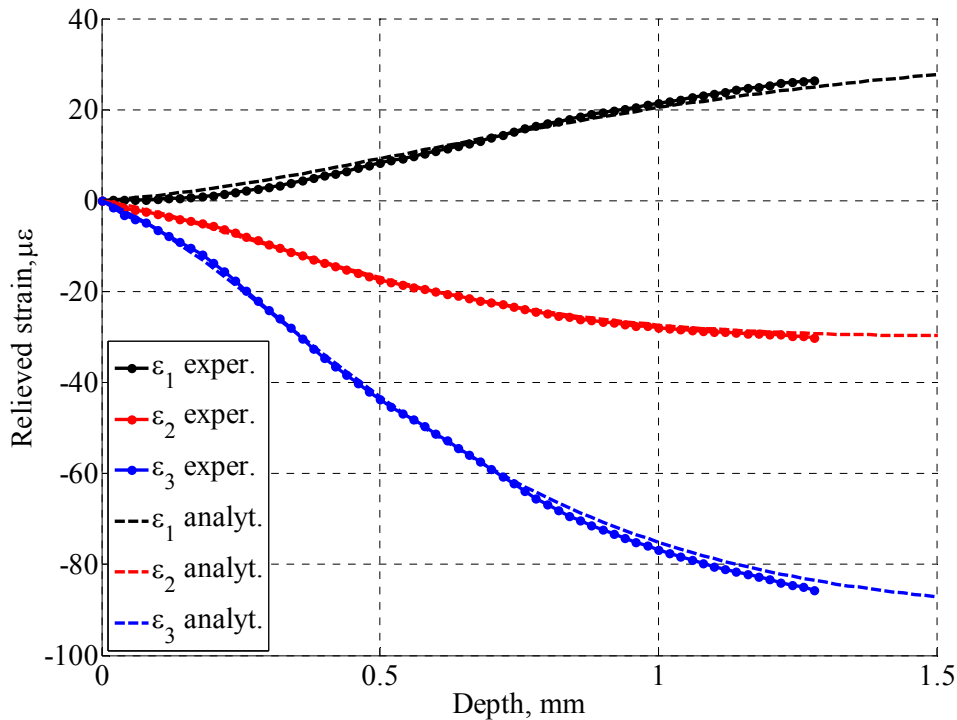


Figura 8. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 6 rami, eccentricità trascurabile.

In Fig.9 si mostra il confronto, per la rosetta a 6 rami, con componenti di eccentricità elevate: $e_x = 0.23 \text{ mm}$, $e_y = -0.295 \text{ mm}$. L'eccentricità di questa seconda prova con la rosetta a 6 rami, è stata imposta intenzionalmente, ed è risultata circa un ordine di grandezza più elevata di quella precedente a 6 rami. Le deformazioni rilassate attese sono state calcolate senza introdurre l'eccentricità nella procedura analitica, nonostante l'elevata eccentricità sperimentale. Come si può osservare la compensazione è molto efficace, in quanto l'errore residuo è dello stesso ordine di grandezza dell'errore nel caso di non eccentricità, attribuibile ad alcuni altri effetti secondari, come ad esempio l'inevitabile errore geometrico del foro. La Fig.10 mostra la stessa risposta sperimentale, confrontata con le deformazioni attese ipotizzando una rosetta a 3 rami e la sua simmetrica, ed introducendo nel calcolo analitico la correzione di eccentricità, in un caso con $e_x = 0.23 \text{ mm}$, $e_y = -0.295 \text{ mm}$, nell'altro con $e_x = -0.23 \text{ mm}$, $e_y = 0.295 \text{ mm}$. In questo modo si simula la risposta di due rosette, a 3 rami, indipendenti, e disposte in modo speculare, sulle quali l'eccentricità ha effetto opposto. La rosetta a 6 rami esegue appunto la media delle due risposte, andando a cogliere molto bene la risposta che dovrebbe essere se l'eccentricità fosse nulla. Da notare però che le deformazioni rilassate attese non sono la media esatta delle deformazioni rilassate dalle due rosette speculari, mentre lo è la risposta sperimentale. Infatti, come affermato da Beghini et al. [7] la compensazione della rosetta a 6 è solo parziale, ma comunque molto efficace come si evince dalle Figg.9,10.

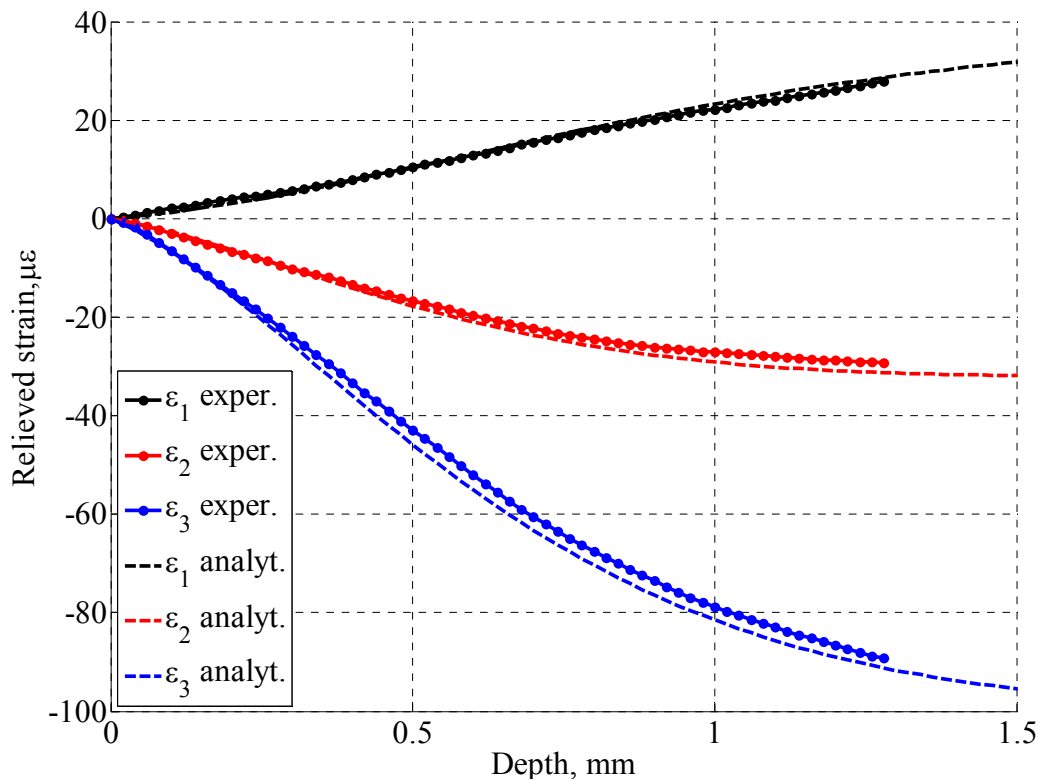


Figura 9. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 6 rami, componenti di eccentricità elevate. Evidente effetto di compensazione.

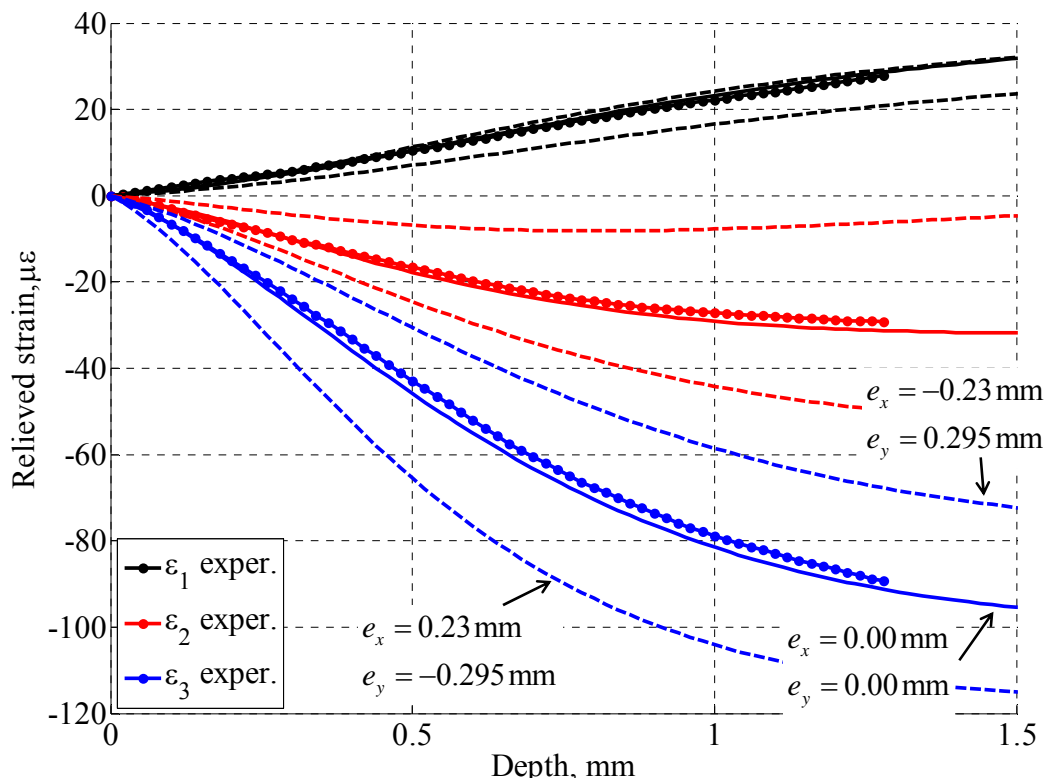


Figura 10. Confronto deformazioni rilassate sperimentali / attese, rosetta a 6 rami eccentricità elevata. Deformazioni rilassate analitiche determinate simulando le letture di due rosette a 3 rami indipendenti speculari. Evidente effetto di compensazione.

5. PROBLEMA INVERSO

Con l'espressione "problema inverso" si intende il calcolo delle distribuzioni delle componenti di tensione residua, lungo la profondità. Come accennato precedentemente la tecnica delle IFs permette in modo "diretto" di determinare le deformazioni rilassate, data la distribuzione di tensione residua, mentre la determinazione della distribuzione di tensione residua viene ottenuta imponendo una forma della soluzione e determinando un numero finito di parametri da cui essa dipende, al fine di approssimare al meglio la distribuzione di deformazione rilassata. Il problema inverso può essere eseguito sui dati di deformazione rilassata riportati, al fine di ottenere il confronto con la tensione di flessione di riferimento. Questo calcolo richiede due scelte: la forma della soluzione e il passo di calcolo, che non può essere più piccolo del passo di misura, altrimenti il problema diventa singolare. Avendo molti passi di misura per passo di calcolo si abbattano gli effetti degli errori e si regolarizza la soluzione anche se, ovviamente, questo va a scapito della risoluzione [8]. In questo lavoro, si sceglie una *spline* lineare con scelta automatica dei passi di calcolo [11]. La Fig.11 riporta la ricostruzione della tensione di flessione, con la procedura di calcolo analitica descritta, introducendo come deformazioni rilassate quelle ottenute con la rosetta a 6 rami, caso di elevata eccentricità, Fig.9, *senza* applicare nessuna correzione di eccentricità, in quanto autocompensata dalla rosetta stessa. Il risultato del confronto è più che soddisfacente, validando quindi sia il metodo del foro stesso, sia l'efficacia in termini di autocompensazione della rosetta a 6 griglie.

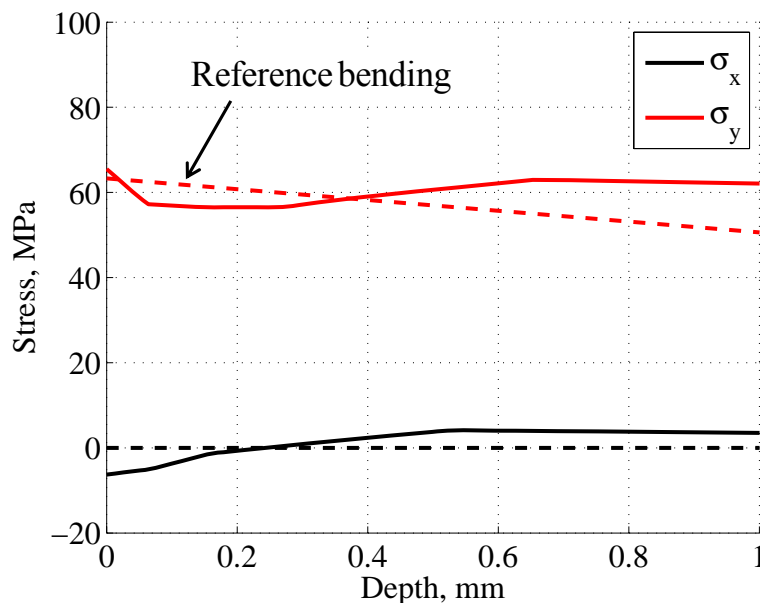


Figura 11. Ricostruzione della tensione di flessione di riferimento, simulata come tensione residua, senza introdurre la correzione di eccentricità, autocompensata dalla rosetta a 6 griglie. Risultato di confronto accurato, nonostante l'elevata eccentricità del foro, intenzionalmente introdotta.

La misura delle tensioni residue con il metodo del foro è, come ben noto, una misura indiretta per cui il basso errore che si evince dal confronto della Fig.11 non può che essere considerato un risultato positivo. La configurazione dell'attuale banco di flessione non ha permesso l'applicazione di tensioni di flessione elevate, e quindi un errore dell'ordine di 10 MPa (come appunto quello riportato in figura) può apparire relativamente elevato, mentre considerato in assoluto è sicuramente trascurabile, se confrontato con i valori tipici di resistenza dei materiali. Ulteriore lavoro è in programma per ripetere questo tipo di prove, applicando una tensione di riferimento quantitativamente più elevata, in modo da riproporre un confronto in cui l'errore relativo sia del tutto marginale.

6. CONCLUSIONI

1. L'errore di eccentricità del foro rispetto al centro della rosetta può comportare errori non trascurabili in termini di deformazioni rilassate rispetto alle deformazioni attese, soprattutto se i valori di eccentricità sono superiori a 0.02 mm.
2. Le rosette a 3 rami hanno mostrato un errore sensibile per effetto dell'eccentricità, ma che tuttavia può essere recuperato, qualora sia possibile misurare l'eccentricità e utilizzare una tecnica di calcolo per la ricostruzione delle tensioni residue, che ammetta appunto l'eccentricità come parametro geometrico.
3. Tuttavia, la rosetta a 6 griglie offre la capacità di *autocompensare* l'effetto di eccentricità. Per ciascun ramo ci sono due griglie diametralmente opposte. Introdotto un foro eccentrico, la griglia più lontana avverte una deformazione rilassata inferiore (in modulo), mentre la griglia più vicina avverte una deformazione rilassata superiore (in modulo). Essendo le due griglie collegate in serie, si ottiene una deformazione rilassata media.
4. Il banco di prova proposto ha permesso di simulare sperimentalmente una tensione residua di flessione, nota con accuratezza. Le deformazioni rilassate lette dalla rosetta a 6 griglie sono risultate molto simili a quelle attese, calcolate dalla distribuzione di tensione di riferimento, ed assumendo eccentricità nulla. È stata quindi verificata sperimentalmente la capacità della rosetta a 6 griglie di autocompensare l'errore di eccentricità, fino a 0.2 – 0.3 mm, molto maggiore dell'eccentricità tipica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano, l'ing. Walter Rosellini per i software di calcolo delle deformazioni rilassate e delle distribuzioni delle componenti di tensione residua, inoltre l'ing. Claudio Luzzio per il notevole contributo all'esecuzione delle prove sperimentali riportate nel lavoro. Infine, gli autori rivolgono un ringraziamento particolare ad HBM, ed in particolare a Bernd Günther e Dirk Eberlein, per la realizzazione e la fornitura delle rosette speciali a 6 griglie mostrate nel presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 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 – TR01:2010.
- [2] P.V. Grant, P.D. Lord, P.S. Whitehead. "The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique". National Physical Laboratory Teddington, Middlesex. Measurement good practice guide 53, 2002.
- [3] ASTM (2008) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM E837-08, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [4] G.S. Schajer, E. Altus, "Stress calculation error analysis for incremental hole-drilling residual stress measurements". ASME Journal of engineering materials and technology, 118(1), 120-126, 1996.
- [5] A. Ajovalasit, A. "Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: Influence of hole eccentricity". The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 14(4), 171-178. 1979.
- [6] 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, DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00683.x, 2010 (In Press).
- [7] 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, DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00684.x, 2010 (In Press).
- [8] 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, DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00664.x, 2010 (In Press).

- [9] E. Valentini, A. Benincasa, L. Bertini, M. Beghini, C. Santus. "Problematiche di misura delle tensioni residue con il metodo del foro nei pressi della superficie". Congresso AIAS XXXVII. Roma, 2008.
- [10] M. Beghini, L. Bertini. "Analytical expressions of the influence functions for accuracy and versatility improvement in the hole-drilling method". *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 35(2), 125-135, 2000.
- [11] M. Beghini, L. Bertini, L.F. Mori, W. Rosellini. "Genetic algorithm optimization of the hole-drilling method for non-uniform residual stress fields". *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 44(1), 105-115, 2009.