

## VERIFICA MEDIANTE BANCO A FLESSIONE DELLA MISURA DI TENSIONE RESIDUA, IN SUPERFICIE E A BASSA PROFONDITÀ, CON IL METODO DEL FORO

C. Santus<sup>\*a</sup>, A. Benincasa<sup>b</sup>, L. Bertelli<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Università degli Studi di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione. Largo Lucio Lazzarino, n.2, 56126 Pisa. \*e-mail: ciro.santus@ing.unipi.it

<sup>b</sup> SINT Technology Srl. Via Giusti, n.229, 50041 Calenzano (FI).

### Sommario

Il metodo del foro per la valutazione delle tensioni residue è stato recentemente sviluppato e migliorato. La valutazione dell'accuratezza del metodo è quindi di notevole interesse. Tuttavia, la misura delle tensioni residue è, per sua natura, non facilmente verificabile. Nonostante siano disponibili in letteratura riscontri positivi con la misura ai raggi X, lo stato di tensione residua può essere poco ripetibile e quindi non si presta ad una verifica di estrema accuratezza. L'utilizzo di un banco a flessione, invece, permette di simulare (come tensione residua) una tensione monoassiale, nota con elevata precisione. Nel presente lavoro, il metodo è stato verificato con successo. Inoltre, è stata verificata l'opportunità di selezionare frese di foratura con fondo piatto, in modo da migliorare la misura nei primi passi di foratura e quindi la previsione delle tensioni residue vicino alla superficie, dove la valutazione è di maggiore interesse.

### Abstract

The strain gage hole drilling method for evaluating residual stresses, has been recently improved. The validation of the method is, therefore, of primarily interest. The residual stress is typically not easy to be reliably verified, with a reference stress. Successfully comparisons with same condition specimen X-ray diffraction measurements were recently published. However, residual stress itself can not be well repeatable, so these are not extremely accurate verifications. On the contrary, bending test rig gives a reference stress, monoaxial, no gradient variation, and known with very high accuracy, that can be used as simulated residual stress. The hole drilling method was successfully verified with this bending test rig, in the present research. More specifically, the effectiveness of the hole drilling tool bottom surface flatness was verified, to evaluate the residual stresses at the surface and at low depth below the surface, where the residual stress evaluation is of main interest.

**Parole chiave:** Tensioni residue; Metodo del foro; Banco a flessione.

### 1. INTRODUZIONE

Il metodo del foro offre un sistema di misura della tensione residua accurato e di semplice esecuzione che quindi lo rende attrattivo rispetto agli altri metodi attualmente esistenti. La misura della tensione residua è tuttavia indiretta, dato che la grandezza effettivamente misurata è la sequenza di deformazioni rilassate ottenute per effetto di progressivi incrementi del foro eseguito concentricamente ad una rosetta estensimetrica a 3 griglie, Fig.1. L'elaborazione di tale segnale permette di valutare lo stato di tensione residua nel volume di materiale rimosso. Negli ultimi anni sono stati ottenuti notevoli miglioramenti, sia in termini di accuratezza dell'esecuzione del foro [1], sia in termini di elaborazione numerica delle deformazioni rilassate [2,3]. È quindi di notevole interesse la

verifica del metodo, specialmente se è possibile eseguirla in condizioni controllate. Questa possibilità può essere ottenuta mediante l'utilizzo di un banco a flessione [4,5].

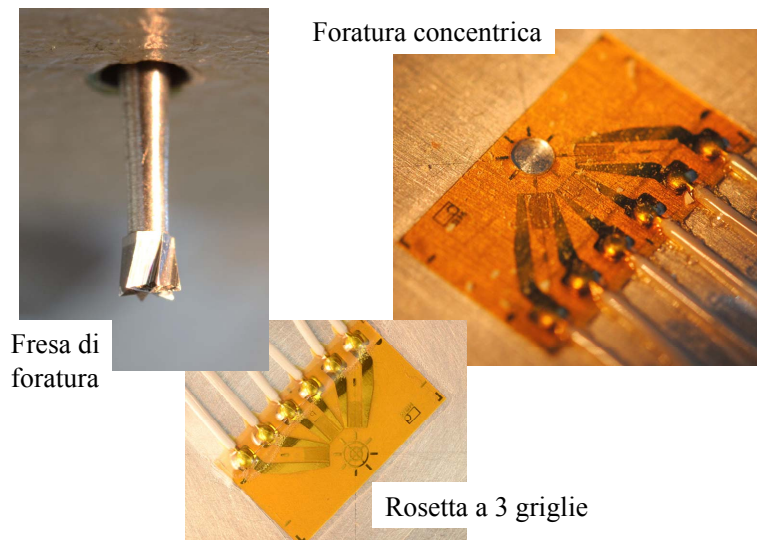


Figura 1: Foratura concentrica ad una rosetta estensimetrica a tre griglie.

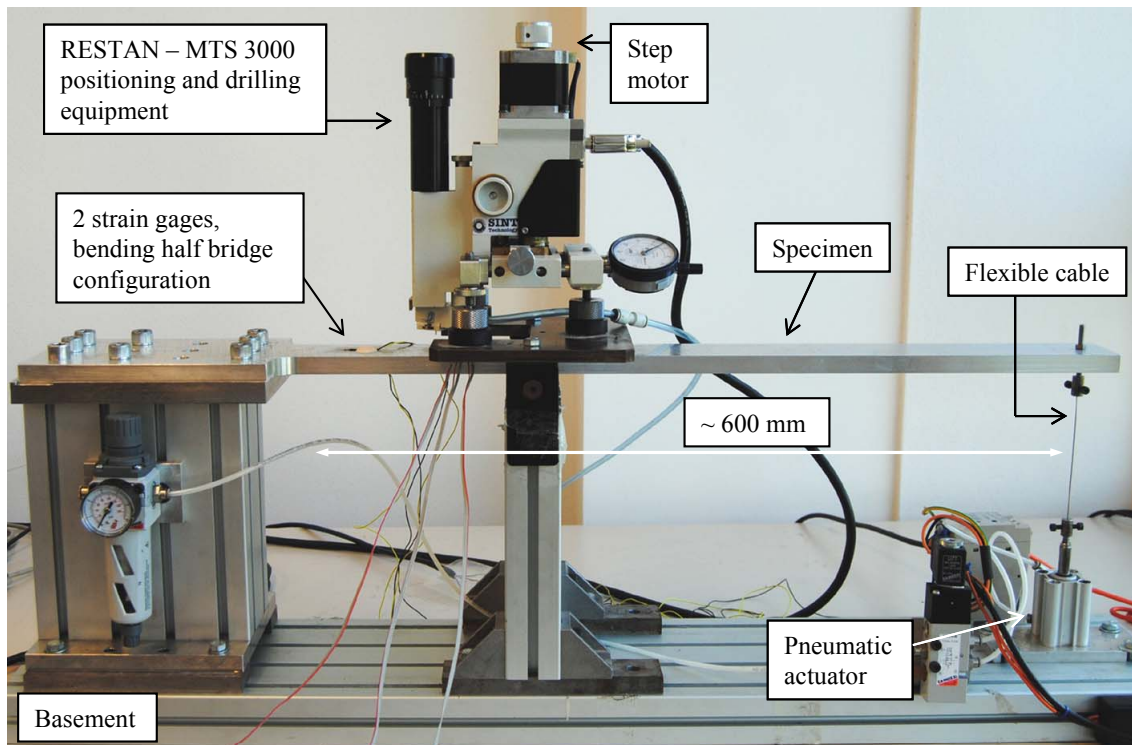


Figura 2: Banco a flessione per simulare, sperimentalmente, una tensione residua di riferimento.

Questa strumentazione, Fig.2, permette di simulare sperimentalmente una tensione di riferimento, nota con elevata precisione, in quanto la tensione di flessione si deduce semplicemente dalla teoria delle travi. La tensione di flessione, che può essere controllata con notevole precisione, può essere confrontata con la distribuzione di tensione risultante dall'elaborazione delle deformazioni rilassate, che si ottengono con il metodo del foro. Il confronto permette di valutare l'accuratezza del metodo e di individuare quelle zone, secondo la coordinata di profondità, dove il risultato del metodo è più o meno preciso. Come noto, il metodo del foro non permette di avere un risultato accurato oltre una certa profondità (tipicamente 1.0-1.5 mm, per un diametro del foro di 1.8-2.0 mm) in quanto le variazioni delle deformazioni rilassate misurate in superficie diventano troppo basse, dato che la rosetta estensimetrica si trova ad elevata distanza dalla zona interessata dalla rimozione del materiale. D'altra

parte, la misura in superficie è influenzata sensibilmente dalla forma del foro, che può essere non perfettamente cilindrica, in particolare a causa di raccordi o di smussi della fresa [6,7] che hanno un ruolo importante soprattutto alle basse profondità di penetrazione e quindi nella misura dei primi incrementi di esecuzione del foro. La misura delle tensioni residue in corrispondenza della superficie è particolarmente interessante perché il metodo del foro si propone come concorrente alla tecnica dei raggi X che è principalmente indicata per misure di tensione residua sulla superficie. Inoltre, la determinazione dello stato di tensione residua superficiale è di principale interesse nella valutazione della resistenza a fatica dato che la formazione della fessura ha la sua fase critica nei primi centesimi di mm a partire dalla superficie.

## 2. FORMA DELLA SUPERFICIE INFERIORE FORO

Un aspetto di notevole interesse per la corretta esecuzione delle misure è la forma del foro che deve essere più possibile simile a un cilindro perfetto. La foratura viene eseguita ad elevatissima velocità di rotazione al fine di non introdurre tensioni residue di lavorazione dovute alla plasticizzazione del materiale circostante il foro [1,6,8]. Questa operazione richiede inevitabilmente una turbina ad aria compressa di piccole dimensioni con velocità di rotazione che si aggira tipicamente intorno a 350 000 – 400 000 giri/min e l'utilizzo di frese di circa 1.8 mm di diametro, Fig1. Nel presente lavoro, sono stati valutati diversi tipi di frese, aventi circa lo stesso diametro, Fig.3. Tipicamente, si ha un'accurata cilindricità nella parte superiore del foro, ma la parte inferiore, in corrispondenza dell'estremità della fresa, presenta zone di raccordo o smussi dovuti alla forma del tagliente.

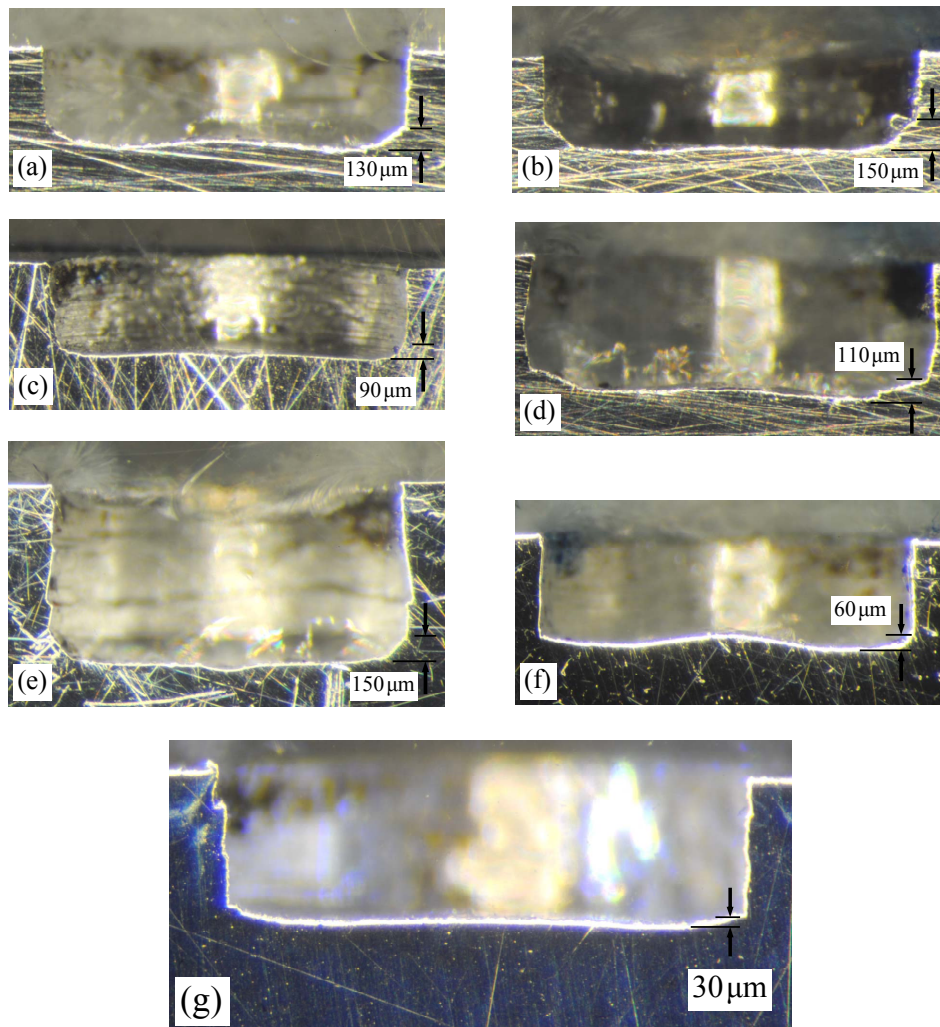


Figura 3: Profili di foro investigati, prodotti da diverse tipologie di fresa.

Come mostrato in Fig.3, l'ultima tipologia di fresa (g) è quella che ha prodotto la forma di foro con la minore differenza di profondità fra l'estremità inferiore del foro e lo spigolo di diametro pari a quello definitivo che viene elaborato. Dato che gli incrementi di foratura sono tipicamente dell'ordine di  $10\mu\text{m}$ , durante i primi passi un diametro del foro inferiore, rispetto al valore rilevato alla fine del foro, porta ad un errore di valutazione delle deformazioni rilassate e quindi delle tensioni residue. Infatti, il modello di riferimento, su cui è basata l'elaborazione delle deformazioni rilassate assume un foro perfettamente cilindrico. L'effetto dovuto al raccordo diventa poi trascurabile quando il foro ha maggiore profondità. Per il miglioramento del metodo del foro nella misura vicino alla superficie, l'effetto della forma del fondo ha pertanto un ruolo prioritario. La procedura di calcolo potrebbe essere affinata per considerare anche questo effetto. Un recente lavoro di Scafidi et al. [7] prevede infatti una correzione basata su un raggio di raccordo a fondo foro. Tuttavia, la modellazione di una forma più complessa del foro, per quanto possibile, complicherebbe notevolmente la formulazione basata sull'approccio analitico delle Funzioni di Influenza (*Influence Functions*, IFs) [2,3], correntemente usate per l'elaborazione delle deformazioni rilassate. Infatti, sarebbe necessario introdurre nel modello, già complesso e critico dal punto di vista numerico, ulteriori parametri geometrici, rispetto ai quali dipende la risposta deformativa rilassata. L'approccio seguito nel presente lavoro è stato quindi quello di selezionare la fresa con la migliore planarità, evidentemente la (g) di Fig.3, e interpretare i risultati ottenuti con il modello di foro cilindrico. In futuro non si esclude tuttavia di formulare IFs modificate in modo da considerare un eventuale angolo di smusso a fondo foro, oppure di richiedere una particolare fornitura di frese aventi un errore di planarità del fondo del foro estremamente ridotto.

### 3. PROCEDURA DI PROVA MEDIANTE IL BANCO A FLESSIONE

Sul banco a flessione rappresentato in Fig.2 è posizionato un provino che consiste in una barra a sezione rettangolare, incastrata ad un'estremità e sottoposta a flessione per mezzo di un carico applicato all'estremità libera, mediante un attuatore pneumatico. L'esecuzione della prova di validazione del metodo del foro mediante banco a flessione prevede un'opportuna sequenza di operazioni. Inizialmente viene applicata la rosetta estensimetrica con le griglie perpendicolari allineate rispetto alle direzioni principali dello stato di tensione di flessione, Fig.4(a). Vengono inoltre incollati due estensimetri in direzione longitudinale, collegati a mezzo ponte, con le griglie parallele all'asse della barra, uno sulla superficie superiore, l'altro sulla superficie inferiore, posizionati vicino all'incastro dove il momento flettente è maggiore, Fig.2. In questo modo si realizza una cella di carico integrata al banco, in grado di misurare la forza effettiva di flessione applicata all'estremità della barra. Il collegamento a mezzo ponte è compensato in temperatura, oltre ad annullare l'effetto della forza normale, anche se nella presente applicazione la sollecitazione è solo di flessione (prevalente) e taglio (trascurabile). Successivamente gli estensimetri vengono azzerati e viene eseguita una sequenza di "allenamento", che consiste in alcuni cicli di carico-scarico della barra al fine di esercitare un'azione di stabilizzazione sull'incollaggio. L'esperienza ha mostrato che dopo circa 10 cicli di carico-scarico, la risposta delle griglie estensimetriche si stabilizza.

In via preliminare è effettuata la taratura del sistema di misura del carico. Inizialmente, è stato applicato un peso noto con elevata accuratezza all'estremità della barra per mezzo di un cavo flessibile, eliminando temporaneamente l'attuatore pneumatico. In questo modo si ha il controllo sia del valore della forza applicata sia della posizione dell'asse della forza stessa rispetto alla coordinata lungo l'asse della barra, essendo il carico allineato con la direzione del cavo. Successivamente, si determina la costante moltiplicativa fra valore della deformazione letta dagli estensimetri, collegati a mezzo ponte, e il carico di flessione. Ripristinato l'attuatore pneumatico si ottiene il valore del carico effettuato dall'attuatore dalla lettura dei due estensimetri a mezzo ponte, applicando la costante moltiplicativa di taratura precedentemente determinata. L'unica fonte di incertezza è la linearità degli estensimetri stessi, che comunque comporta un errore ben inferiore all'1%.

Prima di iniziare la prova vera e propria, il banco a flessione viene usato anche per determinare, con accuratezza, le costanti elastiche del materiale. Si applica il carico dell'attuatore (si può fare riferimento anche al peso noto) e si determinano le tre quantità:  $\varepsilon_i^F(0)$ ,  $i=1,2,3$ , in cui  $i$  è l'indice

della griglia, l'apice  $F$  indica che è applicato il carico, mentre  $(0)$  indica la profondità di foratura, ossia l'assenza del foro.

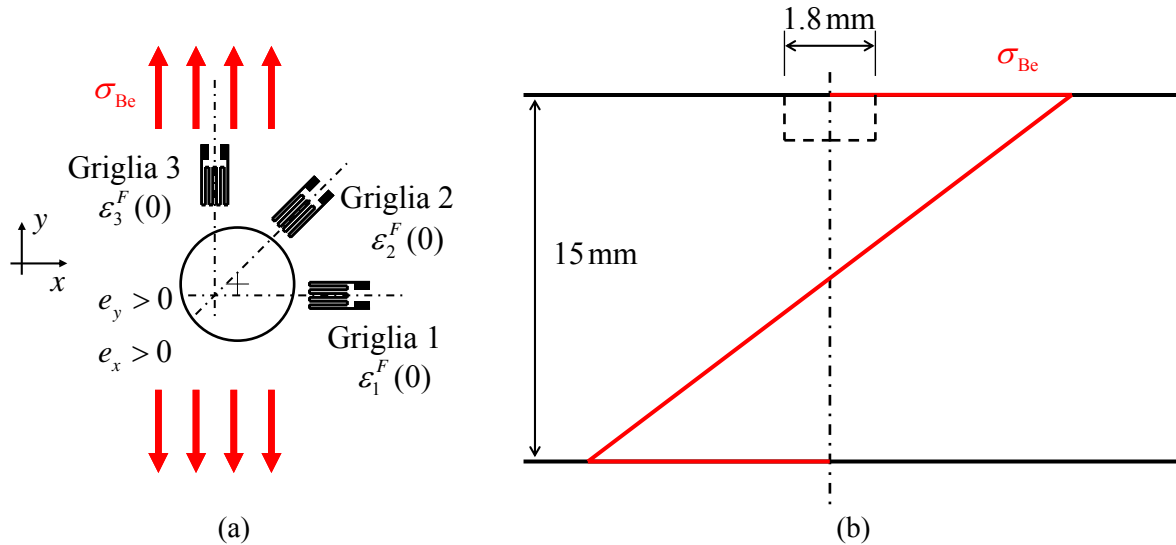


Figura 4: (a) Disposizione della griglia estensimetrica sulla superficie. (b) Distribuzione della tensione monoassiale di flessione secondo la profondità.

Essendo uno stato monoassiale, Fig.4, i due moduli del materiale si ricavano dall'Eq.1:

$$E = \frac{\sigma_{Be}}{\varepsilon_3^F(0)}, \quad \nu = -\frac{\varepsilon_1^F(0)}{\varepsilon_3^F(0)} \quad (1)$$

in cui la massima tensione di flessione  $\sigma_{Be}$ , che si manifesta sulla superficie superiore in corrispondenza del centro della rosetta estensimetrica, può essere ottenuta con le semplici formule della teoria delle travi, Eq.2:

$$\sigma_{Be} = 6 \frac{F b}{w h^2} \quad (2)$$

in cui  $b$  è la distanza fra l'asse della forza dell'attuatore e il centro della rosetta, mentre  $w, h$  sono larghezza e spessore della sezione. L'aspetto significativo è l'elevata accuratezza con cui è nota ciascuna di queste quantità. Come detto in precedenza, la forza  $F$  è nota con notevole precisione, avendo tarato la cella di carico, le misure del braccio  $b$  e delle dimensioni della sezione non comportano problemi di accuratezza. Lo spessore  $h$  (che influisce al quadrato) è stato misurato con il micrometro centesimale, mentre la larghezza  $w$  della barra viene misurata con il calibro e quindi con precisione decimale. Un'analisi delle incertezze di tutte le quantità ha indicato una stima dell'incertezza risultante sul valore di  $\sigma_{Be}$  dell'ordine dell'1%.

La griglia 2 inclinata a  $45^\circ$  rispetto all'asse della barra, non interviene nell'Eq.1. Tuttavia in questa fase preliminare di taratura, l'informazione della griglia 2 è utile. Nell'ipotesi di perfetto allineamento delle griglie 1,3 rispetto alle due direzioni principali, la lettura della griglia 2 è pari alla media aritmetica delle altre due:

$$\varepsilon_2^F(0) = \frac{\varepsilon_1^F(0) + \varepsilon_3^F(0)}{2}, \quad \alpha = 0 \quad (3)$$

in cui  $\alpha$  è l'eventuale angolo di disallineamento della rosetta con le direzioni principali di flessione, Fig.5.

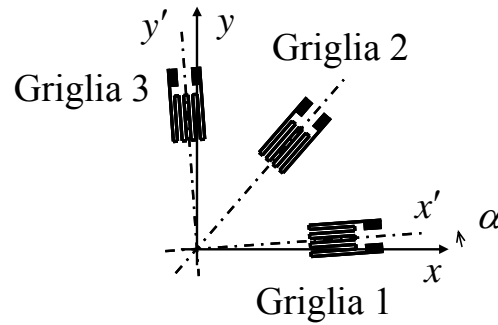


Figura 5: Angolo di disallineamento, tipicamente molto piccolo (esagerato in figura), fra la griglia e le direzioni principali della flessione.

Dato che nell'incollaggio manuale è pressoché impossibile ottenere un perfetto allineamento, in genere la relazione 3 non risulta soddisfatta. Nell'ipotesi di  $\alpha$  piccolo (che si riesce a ottenere con un attento posizionamento della griglia) si ha che le due letture  $\varepsilon_1^F(0), \varepsilon_3^F(0)$  sono pressoché coincidenti con le deformazioni secondo le direzioni principali, trascurando errori di ordine superiore al primo rispetto all'errore angolare, mentre la relazione fra la griglia 2 e l'angolo  $\alpha$  è riportata nell'Eq.4:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1^F(0) - 2\varepsilon_2^F(0) + \varepsilon_3^F(0)}{\varepsilon_1^F(0) - \varepsilon_3^F(0)} \text{ [ rad ] } (\alpha \text{ piccolo}) \quad (4)$$

La lettura della griglia 2, prima dell'esecuzione del foro, permette quindi di determinare l'angolo di disallineamento effettivo  $\alpha$ . Il valore tipico di  $\alpha$  è risultato di circa  $1^\circ$ , anche se in alcuni casi è stato ottenuto un valore inferiore, quindi, sicuramente piccolo ai fini della validità dell'Eq.4. Tuttavia, tale effetto non è trascurabile nella ricostruzione delle deformazioni rilassate (come mostrato in seguito). La Fig.6 riporta l'effetto di un errore di allineamento angolare sulla lettura delle tre griglie, in cui è evidente una variazione significativa solo sulla griglia 2.

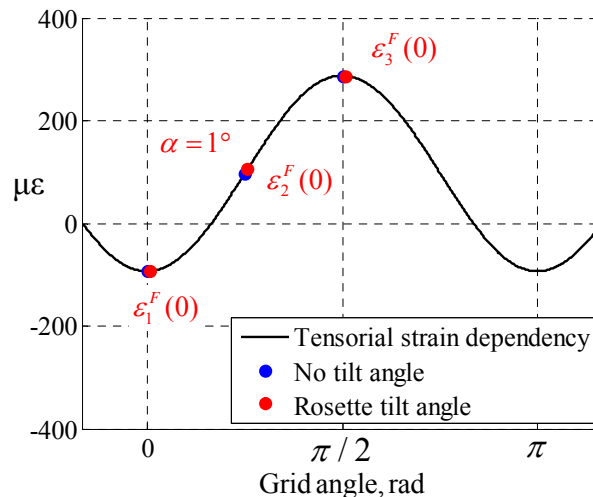


Figura 6: Dipendenza dell'orientamento angolare della griglia, effetto di un piccolo angolo di disallineamento sulle letture delle tre griglie della rosetta estensimetrica.

A questo punto la procedura richiede l'appostamento della fresa alla superficie. Innanzitutto si verifica la perpendicolarità dell'asse del mandrino rispetto alla superficie su cui si esegue il foro. Si procede quindi all'appostamento dell'utensile alla superficie con l'ausilio del contatto elettrico di cui dispone l'attrezzatura. Terminata questa fase di set-up si può avviare la prova. La procedura di prova prevede di leggere le deformazioni estensimetriche a ogni passo di avanzamento del foro, sia senza carico di

flessione, sia con carico di flessione applicato, Fig.7. Un software di controllo gestisce l'hardware ed esegue automaticamente l'intera procedura. Il generico passo prevede l'esecuzione dell'incremento di foro, l'inizio dell'acquisizione delle tre griglie, l'applicazione della forza di flessione e la successiva eliminazione di quest'ultima, che riporta la barra nella posizione iniziale, e la fine dell'acquisizione. La procedura si conclude quando è viene raggiunta un'opportuna profondità del foro, dopo un certo numero di incrementi di foratura.

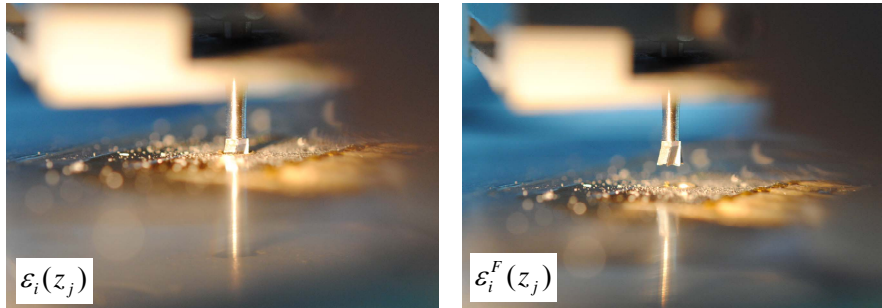


Figura 7: Esecuzione del  $j$ -esimo passo di incremento di foratura. Acquisizione delle deformazioni con e senza carico di flessione.

Come anticipato precedentemente, dopo la foratura il segnale delle tre griglie viene acquisito in continuo. Un esempio di sequenza temporale con i relativi valori di deformazione acquisiti dalle tre griglie è riportato in Fig.8.

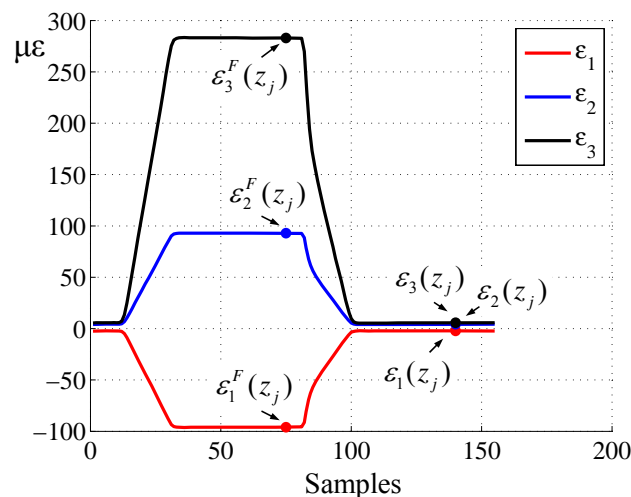


Figura 8: Sequenza temporale e valori acquisiti, con e senza carico di flessione.

Durante l'acquisizione si individuano i valori in *assenza* di carico di flessione  $\varepsilon_i(z_j)$ ,  $i=1,2,3$ , e i valori *con* il carico di flessione  $\varepsilon_i^F(z_j)$ , per ogni incremento di foratura  $j$ -esimo, quindi in corrispondenza di ogni profondità del foro  $z_j$ .

Terminata la procedura di foratura e l'acquisizione si elaborano le deformazioni misurate, secondo l'Eq.5:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j) &= \varepsilon_i(z_j) \\ \varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j) &= \varepsilon_i^F(z_j) - \varepsilon_i(z_j) - \varepsilon_i^F(0) \end{aligned} \quad (5)$$

$\varepsilon_i^{\text{RS}}(z_j)$  sono le deformazioni rilassate dovute alla tensione residua, inevitabilmente presente nella barra, che coincidono con  $\varepsilon_i(z_j)$  qualora le griglie siano state azzerate prima dell'esecuzione del foro.

Le quantità  $\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j)$  sono le deformazioni rilassate dovute *soltanto* alla flessione, avendo disaccoppiato la flessione dalla tensione residua, come riportato nell'Eq.5. La necessità di sottrarre  $\varepsilon_i^F(0)$ , ossia la deformazione letta con carico applicato ma senza foro (oppure con profondità 0 del foro) deriva dal fatto che le deformazioni *rilassate* costituiscono la *variazione* di deformazione dovuta all'introduzione del foro in un volume tensionato, per cui la deformazione rilassata deve essere, per definizione, nulla in assenza del foro. In linea di principio, la prima dell'Eq.5 sarebbe più completa sottraendo il primo valore, per ciascuna griglia, senza foro, a carico nullo:  $\varepsilon_i(0)$ . Questo valore dovrebbe essere nullo, per ciascuna griglia, avendo azzerato elettricamente gli estensimetri prima di iniziare la procedura. In realtà, lo zero può non essere perfettamente stabile e quindi dal momento dell'azzeramento al primo valore acquisito è riscontrabile una lieve deriva. Sottrarre il valore  $\varepsilon_i(0)$  nella prima delle Eq.5, in certi casi può essere utile. Da notare che l'effetto di un accurato azzeramento si ripercuote anche sulla seconda delle Eq.5.

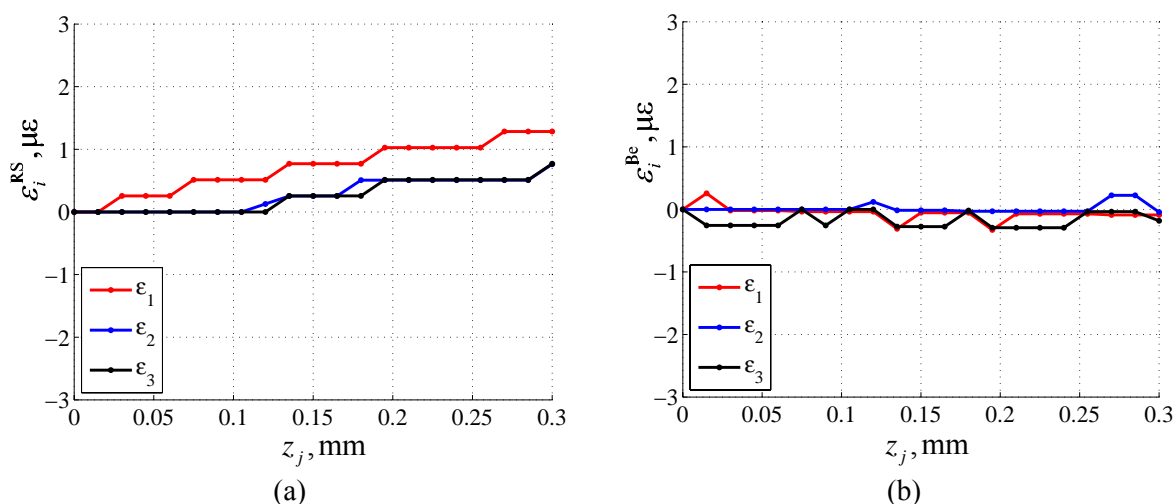


Figura 9: Prova a vuoto: deformazioni rilassate (a) di tensione residua, (b) di flessione.

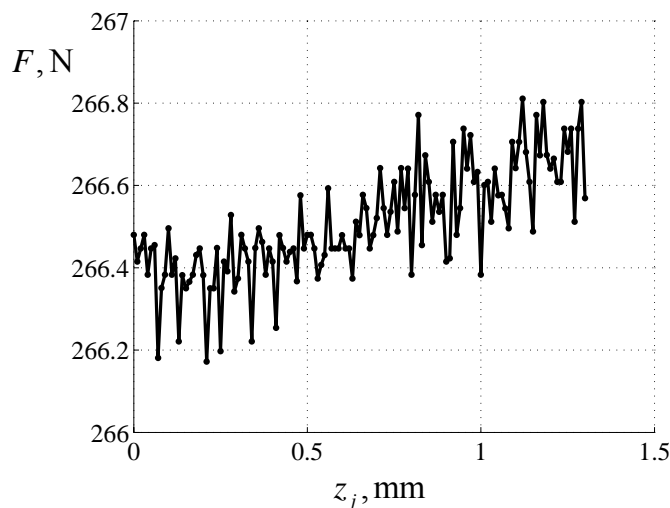


Figura 10: Ripetibilità della forza di flessione, variazioni inferiore all'1% del valore della forza.

Al fine di verificare l'incertezza sul segnale estensimetrico, che può perturbare l'informazione sperimentale  $\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j)$ , sono state eseguite alcune prove "a vuoto", ossia eseguendo l'intera procedura di prova con l'utensile di foratura in posizione sollevata in modo da non rimuovere materiale, Fig.9. Questa prova ha permesso di verificare che la deriva estensimetrica (dovuta presumibilmente a fenomeni elettrici e/o termici sulla singola griglia) è dell'ordine di pochi  $\mu\epsilon$ , Fig.9(a). Questa deriva è

tuttavia poco influente nella valutazione delle tensioni residue, dato che è distribuita sull'intera profondità del foro (in questo caso solo virtuale). Inoltre, nel caso della deformazione di flessione si ha il quasi totale annullamento dell'effetto della deriva dato che a ogni passo si esegue un differenza del segnale della singola griglia, Eq.5, e rimane soltanto la deriva del segnale durante il periodo di tempo fra la lettura con forza applicata e senza forza applicata. L'errore dovuto alla deriva estensimetrica si riduce quindi a frazioni di  $\mu\epsilon$ . Di notevole importanza è, inoltre, la ripetibilità dell'applicazione della forza di flessione, durante l'esecuzione della prova. Come si evince dalla Fig.10, la forza di flessione rimane pressoché costante, dopo che sono stati curati vari dettagli come l'assenza di giochi nel sistema di tiro con cavo flessibile, l'opportuno serraggio delle viti di vincolo e la rigidità della barra al fine di evitare oscillazioni, Fig.2.

A questo punto è possibile procedere con la prova effettiva, rimuovendo il materiale e determinando le deformazioni  $\varepsilon_i^{Be}(z_j)$ . Questo dato rappresenta l'output sperimentale della procedura che viene interpretato mediante l'approccio delle IFs per ottenere un confronto, ai fini della validazione, con la deformazione rilassata di flessione. L'informazione  $\varepsilon_i^{RS}(z_j)$  non viene considerata nel presente lavoro dal momento che lo stato di tensione residua delle barre utilizzate è di bassa entità e non di interesse. In generale questa procedura permette però di effettuare una misura di tensione residua, *contestualmente verificata*, e quindi dedurre la tensione residua con un elevato livello di confidenza per confronto diretto con la flessione [4].

Lo stato di tensione di flessione da cui dipendono le deformazioni rilassate misurate, è monoassiale, con gradiente noto, come rappresentato schematicamente in Fig.4. Essendo la profondità del foro molto inferiore allo spessore della barra, la tensione è pressoché costante. Tuttavia, ai fini della validazione, non è richiesto di assumere che lo stato di tensione sia monoassiale e costante. La procedura di calcolo che utilizza le IFs permette di elaborare un qualunque stato di tensione [2], a condizione che la risoluzione delle letture estensimetriche sia adeguata alla variabilità dello stato di tensione stesso. Anche la condizione di monoassialità non è vincolante e può anche essere riscontrata a posteriori. D'altra parte, considerando l'errore di allineamento fra le direzioni delle griglie e le direzioni principali della flessione, la matrice di tensione che viene considerata è relativamente ruotata dell'angolo  $\alpha$  e quindi compare con una (piccola) componente di taglio, oltre alla componente di tensione normale. In assenza di disallineamento, le componenti di tensione che vengono usate come input della procedura delle IFs è espresso dall'Eq.6, in cui  $z$  è la coordinata di profondità.

$$S(z) = \begin{bmatrix} \sigma_x(z) & \tau_{xy}(z) \\ \tau_{xy}(z) & \sigma_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{Be} \frac{h/2-z}{h/2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Tenendo conto della rotazione dell'angolo  $\alpha$ , Fig.5, gli assi per descrivere lo stato di tensione sono  $x', y'$ , e assumendo quindi  $\alpha$  piccolo ( $\cos(\alpha) \approx 1, \sin(\alpha) \approx \alpha$ ) segue che:

$$S' = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{x'y'} & \sigma_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha \sigma_{Be} \frac{h/2-z}{h/2} \\ \alpha \sigma_{Be} \frac{h/2-z}{h/2} & \sigma_{Be} \frac{h/2-z}{h/2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

La matrice  $S'$  offre quindi la tensione di riferimento per la verifica del metodo del foro.

#### 4. RISULTATI

Il modo più diretto per rappresentare i risultati della verifica mediante il banco a flessione è in termini di deformazione rilassata. Lo stato di tensione  $S'$  generato dal banco a flessione, considerando l'eventuale angolo di disallineamento, può essere usato come input per il "problema diretto" che

rappresenta l'integrazione (numerica) delle IFs [2] al fine di determinare le deformazioni rilassate analitiche di riferimento, da confrontare con i valori sperimentali  $\varepsilon_i^{\text{Be}}(z_j)$ .

La Fig.11 riporta un primo confronto fra i valori attesi e i valori sperimentali delle deformazioni rilassate di flessione. L'effetto dell'errore angolare di disallineamento (in questo caso  $\alpha = 1.28^\circ$ ) è evidente e si ripercuote prevalentemente sulla griglia 2.

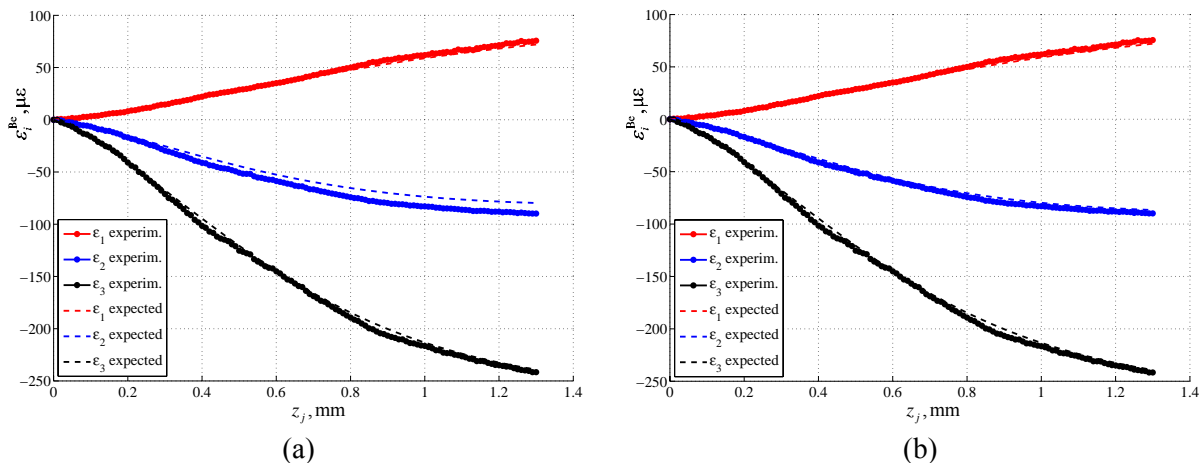


Figura 11: Confronto deformazioni rilassate sperimentali - attese: (a) *senza* correzione angolare, tensione  $S$ , Eq.6; (b) *con* correzione angolare, tensione  $S'$ , Eq.7.

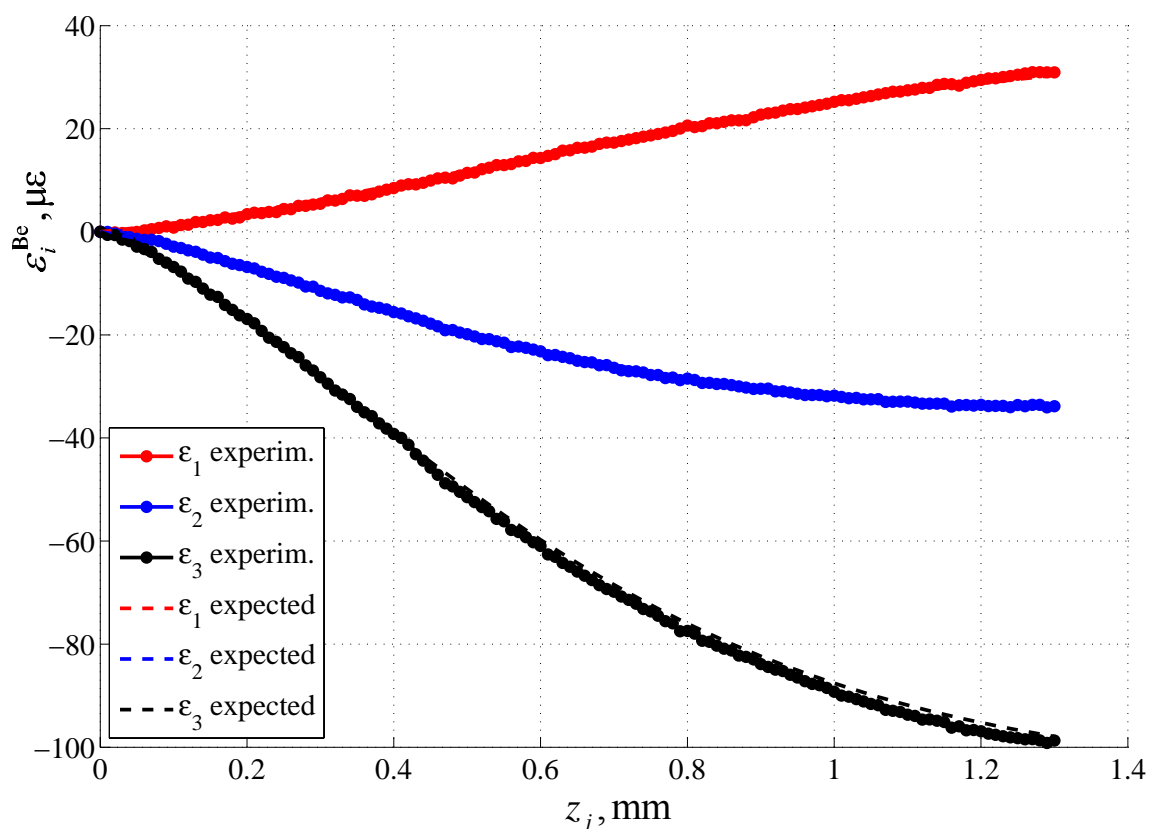


Figura 12: Confronto deformazioni rilassate sperimentali – attese, minore tensione di flessione.

In Fig.12 è riportato un altro esempio di confronto, con un valore significativamente più basso della tensione di flessione. Le Figg.11,12 mostrano un'eccellente accordo fra gli andamenti delle deformazioni rilassate ed attese, che conferma la validità dell'intera procedura sperimentale e l'accuratezza di tutte le misure effettuate. In particolare, si osserva un'ottima coincidenza fra le

deformazioni sperimentali e previste anche in corrispondenza delle basse profondità, vicino alla superficie, Fig.13. È evidente che l'elevata planarità della superficie inferiore del foro (fresa di foratura (g), Fig.3) permette di ottenere deformazioni rilassate accurate su fori poco profondi, e quindi offrire una buona previsione dello stato di tensione in corrispondenza della superficie.

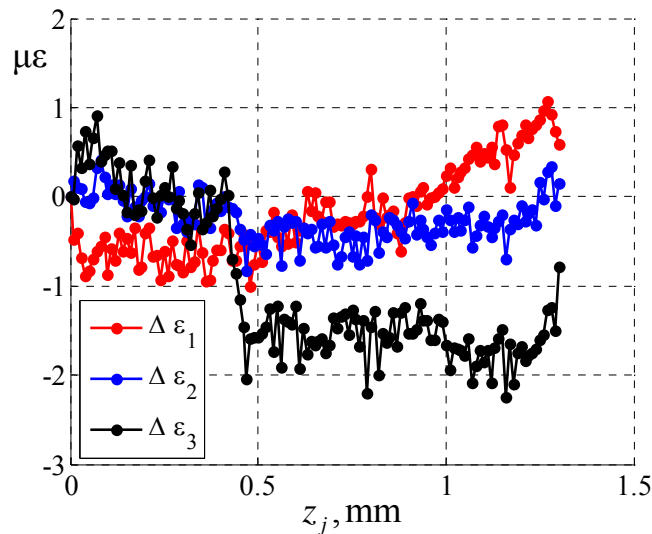


Figura 13: Differenza fra deformazioni rilassate attese e sperimentali. Valori di differenza molto bassi anche nei pressi della superficie.

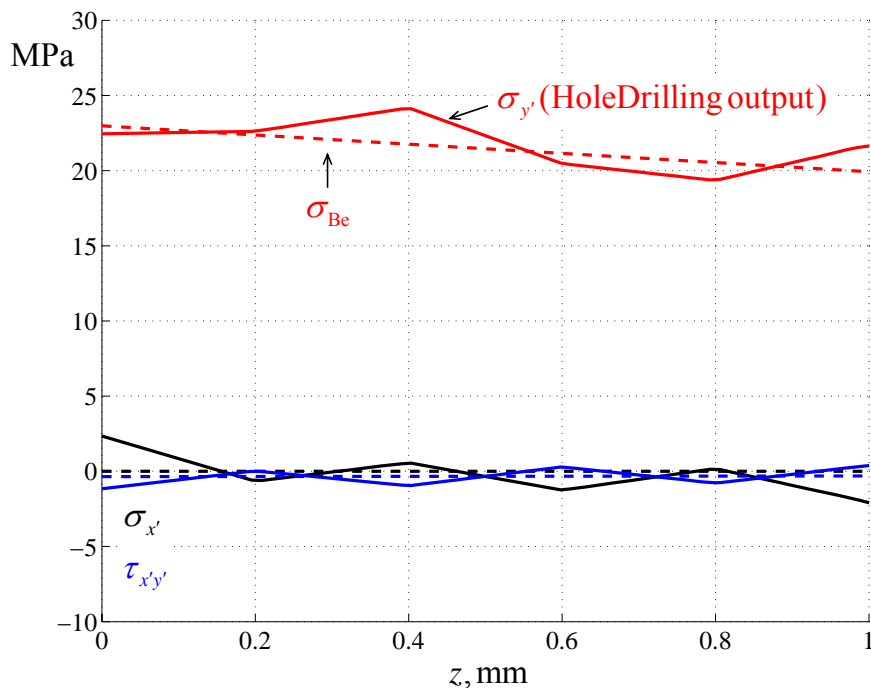


Figura 14: Confronto della tensione ricostruita dal metodo del foro, mediante l'approccio delle IFs, in ottimo accordo con la tensione di flessione di riferimento.

In Fig.14 è riportato il risultato in termini di tensioni, con il confronto fra lo stato di tensione  $S'$ , includendo l'effetto dell'angolo di disallineamento, e il risultato di distribuzione delle tensioni residue secondo l'approccio delle IFs. L'entità dell'errore fra tensione valutata e tensione di riferimento è particolarmente basso, di pochi MPa nel punto massimo. In Fig.15 si mostra l'elaborazione delle deformazioni rilassate di Fig.12 limitatamente alla profondità di 0.4 mm. È evidente un'eccellente coincidenza delle tensioni ricostruite mediante il metodo rispetto alla tensione di riferimento. Come

fatto notare in precedenza l'elemento che ha permesso questo risultato è la buona planarità del fondo del foro ottenuta mediante la tipologia di fresa selezionata.

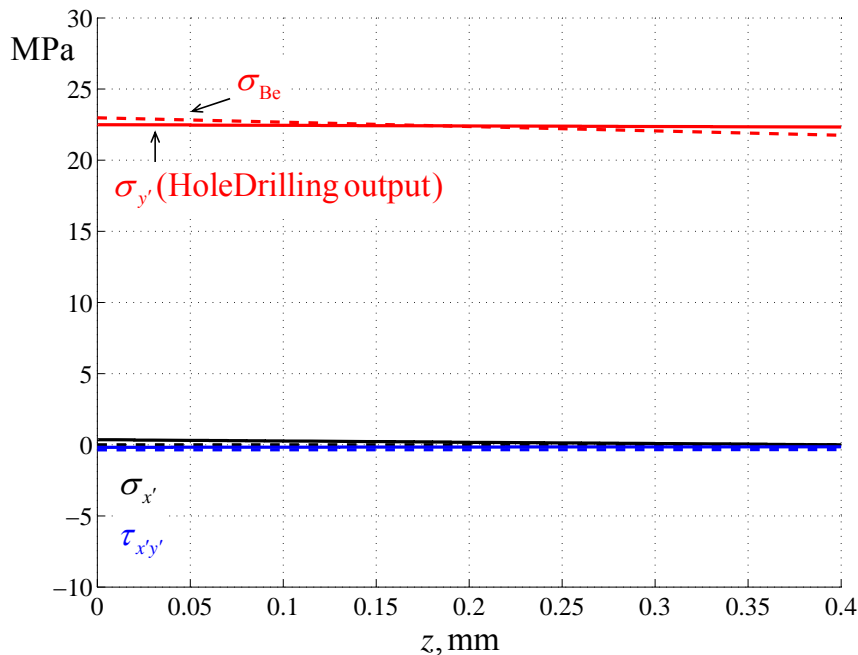


Figura 15: Confronto tensione ricostruita - tensione di flessione di riferimento. Limitata alla prima profondità di 0.4 mm. Evidenza della corretta valutazione delle tensioni in superficie.

Infine, il risultato di Fig.12, ed anche le ricostruzioni di tensione delle Figg.14,15, rappresentano un'evidente verifica sperimentale dell'approccio delle IFs e dei relativi coefficienti da cui esse dipendono, precedentemente valutati mediante la tecnica numerica agli elementi finiti.

## 5. CONCLUSIONI

- La procedura di verifica della misura con il metodo del foro mediante un banco a flessione è stata perfezionata, ottenendo un'accuratezza metrologica sulle grandezze che hanno un peso nella procedura di verifica: valore della tensione di riferimento, eccentricità e diametro del foro, angolo di disallineamento fra rosetta e direzioni principali dello stato di tensione.
- La morfologia della fresa per l'esecuzione del foro è stata selezionata al fine di ottenere un foro il più possibile cilindrico e avere una minima entità di raccordo, o smusso, in corrispondenza del fondo foro, migliorando l'accuratezza delle deformazioni rilassate specialmente a bassi valori di profondità.
- La validazione in termini di deformazione rilassata ha riportato errori di pochi  $\mu\epsilon$  su tutto il campo di profondità investigato, e in particolare in corrispondenza dei primi incrementi di foratura, confermando l'efficacia della forma della fresa selezionata.
- La differenza fra tensione di flessione, di riferimento, e tensione valutata dalle deformazioni sperimentali è estremamente bassa specialmente in superficie, dimostrando la competitività del metodo per rilevare tensioni residue a bassa profondità.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'ing. Emilio Valentini della SINT Technology per il supporto fornito al presente lavoro. Inoltre, un ringraziamento speciale va a all'ing. Simone Bastregghi per il notevole contributo all'esecuzione delle prove sperimentali riportate nel lavoro.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] 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. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00683.x
- [3] 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. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00684.x
- [4] 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*, 47(s1): e605-e618, 2011. DOI: 10.1111/j.1475-1305.2009.00664.x
- [5] M. Beghini, L. Bertini, C. Santus, A. Benincasa, A. Bertelli, E. Valentini. “Validazione sperimentale di una rosetta a 6 griglie per ridurre l'errore di eccentricità nella misura delle tensioni residue”. Congresso AIAS XXXIX, Maratea (PZ), 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ASTM (2008) Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM E837-08, ASTM International, West Conshohocken, PA.