

EFFETTI DEL RAGGIO DI RACCORDO AL FONDO FORO NELLA ANALISI DELLE TENSIONI RESIDUE CON IL METODO DELLA ROSETTA FORATA

M. Scafidi^a, E. Valentini^b, B. Zuccarello^c

^{a,c} *Dipartimento di Meccanica (DIMA), Università degli Studi di Palermo,
V.le delle Scienze – Edificio 8 – 90128 Palermo
e-mail: ^ascafidi@dim.unipa.it, ^czuccarello@dim.unipa.it*
^b *SINT Technology S.r.l. – V. Giusti, 229 – 50041 Calenzano (Fi)
e-mail: emilio.valentini@sintechnology.com*

Sommario

Il metodo della rosetta forata è una delle tecniche di analisi delle tensioni residue più utilizzati in campo industriale. Il metodo è abbastanza accurato per tensioni costanti, mentre nel caso di tensioni variabili nello spessore del componente esaminato diverse cause di incertezza devono essere attentamente esaminate. Poiché nella valutazione numerica dei coefficienti di influenza il foro è considerato perfettamente cilindrico e privo di raccordo, una sorgente di errore è costituita dal raggio di raccordo al fondo foro. In questa memoria viene studiato l'effetto che il raggio di raccordo ha sulle deformazioni misurate e sulle tensioni calcolate. E' così mostrato come anche piccoli raggi di raccordo possono essere causa di errori significativi sulle tensioni calcolate. Inoltre, è proposto un metodo semplice di correzione degli errori sulle tensioni calcolate.

Abstract

The hole drilling method is one of the most used techniques for the residual stresses analysis in the industrial field; it is due mainly to the reduced damage of the specimen and to the low cost. The method is quite accurate for uniform stresses, whereas in the case of non-uniform residual stresses its accuracy, is affected by many error sources. One of these error sources is represented by the fillet radius at the bottom of the hole. In this paper the effect of such a fillet both in the relaxed strains and in the computed stresses, has been studied by numerical simulations that have shown that also small fillet radius can lead to large stress errors. Moreover, a simple approach that allows the user the correction of the computed residual stress is proposed.

Parole chiave: tensioni residue, metodo della rosetta forata, metodo integrale, BEM.

Introduzione

Il metodo della rosetta forata è una tecnica molto diffusa per la determinazione delle tensioni residue (TR) nei componenti meccanici. La sua diffusione è dovuta alla semplicità di utilizzo, alla relativa economicità ed al ridotto danneggiamento del componente

analizzato. Ciò giustifica la vasta letteratura presente in materia e la standardizzazione *ASTM* del metodo per TR uniformi avvenuta con la norma E837 [1].

In presenza di TR non uniformi nello spessore il foro viene effettuato con approfondimenti successivi e le TR sono valutate elaborando le deformazioni misurate con uno dei metodi proposti in letteratura quali il *metodo integrale* [2], il *metodo delle serie di potenze* [3] ed il *metodo spline* [4]. Ultimamente sono stati proposti altresì metodi di risoluzione del problema inverso che si basano sulla ricerca della distribuzione di TR le cui corrispondenti deformazioni rilassate meglio approssimano le effettive deformazioni rilassate misurate sperimentalmente [5-6].

Tutti questi metodi di analisi delle TR non uniformi nello spessore, risentono in genere degli errori di misura delle deformazioni [7-8] e degli errori geometrici del sistema foro-rosetta [7]. Per ridurre l'influenza degli errori di misura delle deformazioni sono state proposte diverse metodologie di analisi che consistono nella approssimazione dei dati estensimetrici [9] e/o nell'ottimizzazione dei passi di foratura [8]; per gli errori dovuti all'eccentricità del foro sono stati proposti metodi di correzione per tensioni uniformi [10] e per tensioni variabili [11].

Elevati errori geometrici possono verificarsi durante l'esecuzione del foro, che, in genere, avviene tramite un sistema automatico di foratura ad alta velocità (circa 400000 rpm) con un utensile in carburo di tungsteno [12], che consente di ottenere un foro cilindrico con limitate tensioni indotte [13]. Per applicazioni particolari il foro è realizzato tramite una punta diamantata (materiali particolarmente duri) [12,14] o attraverso le tecniche dell'*Air Abrasive* [14-15] e dell'*EDM (Electric Discharge Machining)* [15-16].

Per qualunque tecnica di foratura il foro presenta in genere errori rispetto alla condizione ideale di foro cilindrico con fondo piatto (vedi anche fig.1), quali:

1. errore sul diametro effettivo (differente dal diametro nominale D), affetto dalla incertezza di misura [17];
2. errore sulla profondità dei vari passi di foratura a causa sia dell'incertezza con cui è possibile misurare gli incrementi di foratura sia dell'errore sulla determinazione della quota di inizio foratura [17];
3. errore di ortogonalità tra l'asse del foro e la superficie da forare.
4. fondo foro non piatto a causa della presenza di un inevitabile raccordo tra il fondo stesso ed il fianco del foro [12-16,18-19].

Una valutazione degli effetti di tali errori sulla determinazione delle TR è stata eseguita solo per i primi due punti [7]. A parte il lavoro riportato in [19], nel quale si cerca di correggere l'effetto del raggio di raccordo considerando un foro di diametro ridotto rispetto all'effettivo, non sono presenti in letteratura studi sugli effetti che il raggio di raccordo produce sulle deformazioni misurate e, di conseguenza, sulle TR calcolate.

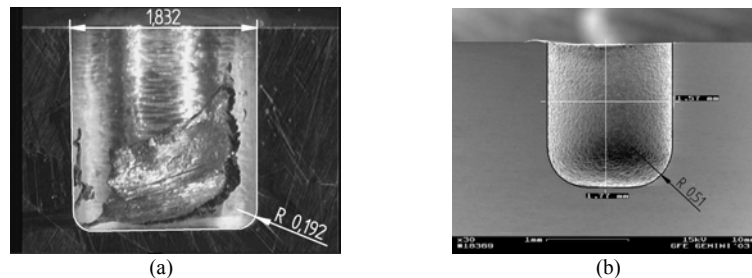


Figura 1 – Sezione trasversale di foro eseguito con punta a cono rovesciato in carburo di tungsteno rivestito da TiAlN (a) e di foro eseguito con tecnologia *EDM* (figura tratta da [16]) (b).

In figura 1a è mostrata la sezione diametrale di un foro eseguito con foratura ad alta velocità mediante una fresa in carburo di tungsteno rivestita con TiAlN (l'irregolarità

presente è dovuta alla esecuzione del taglio); si osserva un raggio di raccordo pari a circa il 10% del diametro nominale D . In figura 1b (tratta da [16]) è mostrato un foro ottenuto con tecnica *EDM*; in questo caso si osserva un raggio di raccordo dell'ordine del 25-30% del diametro D .

Mediante sistematiche simulazioni numeriche, in questa memoria è analizzato l'effetto che il raggio di raccordo al fondo foro ha sulle deformazioni rilassate e sulle TR calcolate con il metodo integrale. In particolare è messa a punto una procedura di correzione degli errori sulle TR che può vantaggiosamente essere utilizzata anche per valutare l'incertezza delle TR calcolate, dovuta alla incertezza di misura del raggio di raccordo al fondo foro. Una applicazione pratica del metodo proposto mostra la bontà delle previsioni e della procedura di correzione messa a punto.

2. Sommario del metodo della rosetta forata per tensioni residue non uniformi

In presenza di TR non uniformi nello spessore del componente esaminato, il metodo della rosetta si basa sulla elaborazione delle deformazioni misurate a seguito di ciascun approfondimento successivo del foro, realizzato al centro di una opportuna rosetta estensimetrica installata sulla superficie del componente meccanico da analizzare. Per l'elaborazione possono essere usati uno dei metodi proposti in letteratura quali *il metodo integrale*, *il metodo delle serie di potenze* ed *il metodo spline*. Sebbene altri metodi di elaborazione basati sulla risoluzione del problema inverso sono stati proposti in letteratura, attualmente il metodo integrale è quello più utilizzato.

Nel metodo integrale, i vettori \mathbf{P} , \mathbf{Q} e \mathbf{T} delle componenti P_n , Q_n e T_n ($1 < n < N$, essendo N il numero totale di approfondimenti del foro) delle tensioni residue medie presenti in corrispondenza dell' n -esimo approfondimento del foro, sono legati ai vettori \mathbf{p} , \mathbf{q} e \mathbf{t} delle componenti p_n , q_n , e t_n delle deformazioni misurate a seguito di ciascun approfondimento, dalle relazioni matriciali [2-3]:

$$\mathbf{P} = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{p}, \quad \mathbf{Q} = E \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{q}, \quad \mathbf{T} = E \cdot \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{t}. \quad (1-3)$$

Nelle (1-3) \mathbf{A} e \mathbf{B} sono le matrici dei coefficienti di influenza valutati mediante simulazioni numeriche considerando una geometria ideale del foro, cioè un foro cilindrico con fondo perfettamente piatto.

Dalle (1-3) le tensioni principali $\sigma_{(max,min)n}$ e l'angolo β_n di orientamento della croce delle tensioni principali [1] per ciascun approfondimento si calcolano tramite le relazioni:

$$\sigma_{\max, \min n} = P_n \pm \sqrt{Q_n^2 + T_n^2}, \quad \text{e} \quad \beta_n = \frac{1}{2} \arctan \frac{-T_n}{-Q_n}, \quad 1 \leq n \leq N \quad (4-5)$$

3. Simulazioni numeriche

Per analizzare gli effetti del raggio di raccordo al fondo foro sulle deformazioni rilassate a seguito di ciascun approfondimento del foro, utilizzando il metodo degli elementi al contorno (*BEM*, codice *Beasy*[®]), sono state eseguite sistematiche simulazioni numeriche per valutare le deformazioni rilassate ε_r in presenza di raggio di raccordo r .

In figura 2a è mostrato un particolare del modello bidimensionale assialsimmetrico utilizzato per la determinazione delle deformazioni rilassate in presenza di una distribuzione equibiassiale di TR. In figura 2b è rappresentato invece un particolare del modello 3D usato per la simulazione di stati di TR di taglio puro.

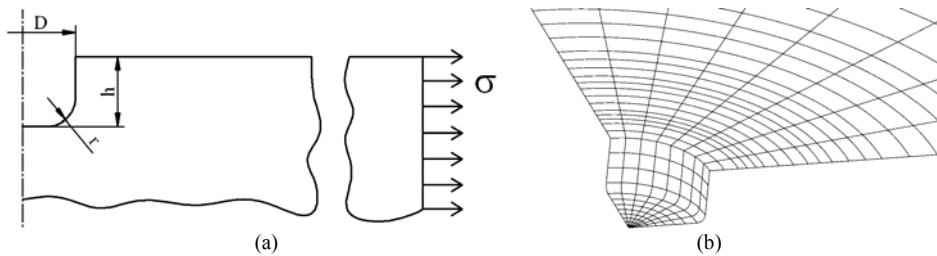


Figura 2 – Particolare del modello 2D utilizzato per le simulazioni numeriche di TR equibiassiali (a) e del modello 3D usato per simulare stati di TR di taglio puro (b)

Per entrambi i modelli il foro è stato eseguito con 20 passi di foratura sino a raggiungere la profondità massima di $0.25D_m$, essendo D_m il diametro medio della rosetta. Sono stati in particolare considerati raggi di raccordo corrispondenti al parametro dimensionale $\rho=r/D=0,05, 0,10, 0,15, 0,20$. I risultati forniti dal modello 3D hanno mostrato come in generale l'errore sulle deformazioni rilassate è praticamente indipendente dall'orientamento della griglia estensimetrica.

Indicando con ε_0 la deformazione ideale corrispondente a $r=0$, per ciascun caso esaminato l'errore percentuale $e\%$ sulla generica deformazione rilassata dovuto al raggio di raccordo al fondo foro può essere pertanto valutato mediante la semplice relazione:

$$e\% = 100 \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

In figura 3 è mostrato l'andamento dell'errore percentuale $e\%$ così definito al variare della profondità adimensionale del foro $h = z/R_m$ e del raggio di raccordo adimensionale $\rho=r/D$ per $d=D/D_m=0.4$.

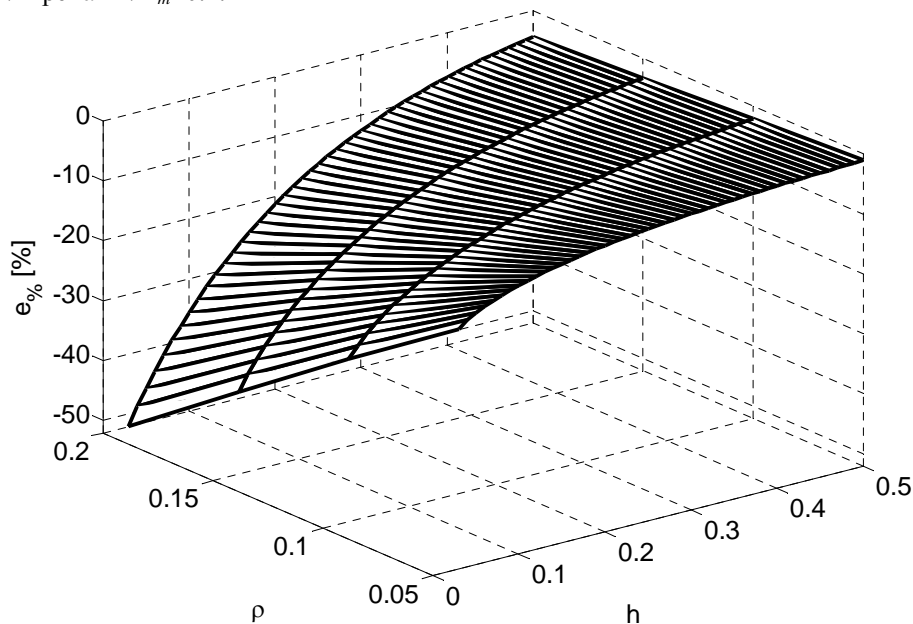


Figura 3 – Andamento dell'errore percentuale $e\%$ in funzione di h e ρ , per $d=D/D_m=0.4$

Da questa figura si osserva che errori relativamente elevati sulle deformazioni rilassate si verificano per i primi passi di foratura; tali errori sono superiori al 30% per valori ricorrenti $\rho=0.10$ e raggiungono valori fino al 50% per $\rho = 0.2$. Mappe analoghe a quella mostrata in figura 3 sono state ottenute per diversi valori di D/D_m .

Mediante approssimazione con metodo dei minimi quadrati (LSM) si è ottenuto che la funzione di errore $e_{\%}$ è bene approssimata da una legge polinomiale del tipo:

$$e_{\%} = -\exp[a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 y + a_4 h \cdot y + a_5 \ln(h) + a_6 y \ln(h)], \quad (7)$$

essendo $y = \ln(\rho)$. I coefficienti a_i ($i = 0 \div 6$) del polinomio (7) dipendono unicamente dal rapporto adimensionale $d=D/D_m$ secondo le seguenti semplici relazioni:

$$a_0 = 4.3629 + 3.2436d + 4.6746d^2; \quad (8)$$

$$a_1 = -9.2308 + 25.3635d - 43.2283d^2; \quad (9)$$

$$a_2 = 4.5836 - 31.1501d + 44.4574d^2; \quad (10)$$

$$a_3 = 1.9251 - 1.9850d + 2.3689d^2; \quad (11)$$

$$a_4 = -1.4875 + 2.6725d - 2.3787d^2; \quad (12)$$

$$a_5 = -0.3710 + 0.7356d + 1.4875d^2; \quad (13)$$

$$a_6 = 0.1832 - 0.5699d + 1.0361d^2. \quad (14)$$

Per $0.02 \leq h \leq 0.5$, $0.3 \leq d \leq 0.5$ e $0.05 \leq \rho \leq 0.20$ le (8-14) approssimano i dati numerici in modo molto accurato (errori generalmente compresi nel range $\pm 1\%$).

4. Discussione

Tenuto conto della (6), in presenza di raggio di raccordo r la relazione tra le componenti ideali di deformazione \mathbf{p} , \mathbf{q} e \mathbf{t} ($r=0$) e le componenti effettive \mathbf{p}_r , \mathbf{q}_r e \mathbf{t}_r ($r \neq 0$) è rappresentata da:

$$\mathbf{p}_r = \mathbf{D}_e \cdot \mathbf{p}, \quad \mathbf{q}_r = \mathbf{D}_e \cdot \mathbf{q}, \quad \mathbf{t}_r = \mathbf{D}_e \cdot \mathbf{t}. \quad (15-17)$$

in cui \mathbf{D}_e è una matrice diagonale il cui n -esimo elemento vale $(1 + (e_{\%})_n / 100)$, essendo $(e_{\%})_n$ l'errore di cui è affetta l'ennesima deformazione, calcolato mediante la (7). Invertendo le (15-17) si può anche scrivere:

$$\mathbf{p} = \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{p}_r, \quad \mathbf{q} = \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{q}_r, \quad \mathbf{t} = \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{t}_r. \quad (18-20)$$

in cui ovviamente $\mathbf{D}_{1/e}$ è la matrice diagonale di correzione il cui ennesimo elemento vale $(1 + (e_{\%})_n / 100)^{-1}$. Sostituendo le (18-20) nelle (1-3) si ottiene quindi:

$$\mathbf{P} = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{p}_r; \quad \mathbf{Q} = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{q}_r; \quad \mathbf{T} = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e} \cdot \mathbf{t}_r. \quad (21-23)$$

Le (21-23) consentono quindi di valutare le effettive tensioni residue anche in presenza di raggio di raccordo al fondo foro, previa valutazione della matrice di correzione a partire dalla (7). Se non si introduce la matrice di correzione si ottengono invece le tensioni errate \mathbf{P}_r , \mathbf{Q}_r e \mathbf{T}_r :

$$\mathbf{P}_r = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{p}_r; \quad \mathbf{Q}_r = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{q}_r; \quad \mathbf{T}_r = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{t}_r. \quad (24-26)$$

Utilizzando le (21-26) l'errore percentuale sulle componenti di tensione è fornito pertanto dalla espressione:

$$\mathbf{e}_{P\%} = 100 \mathbf{D}_{1/P} \cdot (\mathbf{P}_r - \mathbf{P}); \quad \mathbf{e}_{Q\%} = 100 \mathbf{D}_{1/Q} \cdot (\mathbf{Q}_r - \mathbf{Q}); \quad \mathbf{e}_{T\%} = 100 \mathbf{D}_{1/T} \cdot (\mathbf{T}_r - \mathbf{T}). \quad (27-29)$$

essendo $\mathbf{D}_{1/X}$ la matrice diagonale i cui elementi sono rappresentati dagli inversi delle componenti X_n ($X=P,Q,T$).

Sostituendo le (1-3) e le (24-26) nelle (27-29) e usando le (15-17) si ha l'espressione:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{P\%} &= 100 \frac{E}{1+\nu} \mathbf{D}_{1/P}^{-1} (\mathbf{D}_e - \mathbf{I}) \mathbf{a} \mathbf{P}; \\ \mathbf{e}_{Q\%} &= 100 \frac{E}{1+\nu} \mathbf{D}_{1/P}^{-1} (\mathbf{D}_e - \mathbf{I}) \mathbf{b} \mathbf{Q}; \\ \mathbf{e}_{T\%} &= 100 \frac{E}{1+\nu} \mathbf{D}_{1/P}^{-1} (\mathbf{D}_e - \mathbf{I}) \mathbf{b} \mathbf{T}; \end{aligned} \quad (30-32)$$

dove \mathbf{I} è la matrice identità. Le (30-32) mostrano come l'errore percentuale nel calcolo delle TR che si commette trascurando l'effetto del raggio di raccordo dipenda, oltre che dalle caratteristiche del materiale e dal raggio di raccordo, dalle matrici dei coefficienti d'influenza (e quindi dai passi di foratura) e dalla distribuzione delle TR stesse.

Nel caso sia noto il valore del raggio di raccordo r , le (21-23) consentono di calcolare le TR effettivamente presenti, mentre le (30-32) consentono di valutare l'errore che si commette trascurando l'effetto del raggio di raccordo.

Le (21-23) possono essere anche vantaggiosamente utilizzate per valutare l'incertezza U_x ($x=P,Q,T$) di cui sono affette le componenti delle TR calcolate a causa della incertezza u_r di misura (o stima) del raggio di raccordo al fondo foro.

Indicando con $\mathbf{D}_{1/e}^+$ e $\mathbf{D}_{1/e}^-$ le matrici di correzione corrispondenti rispettivamente ai raggi di raccordo $r+u_r$ ed $r-u_r$ si può scrivere:

$$\mathbf{P}^+ = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^+ \mathbf{p}_r; \quad \mathbf{Q}^+ = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^+ \mathbf{q}_r; \quad \mathbf{T}^+ = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^+ \mathbf{t}_r. \quad (33-35)$$

$$\mathbf{P}^- = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^- \mathbf{p}_r; \quad \mathbf{Q}^- = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^- \mathbf{q}_r; \quad \mathbf{T}^- = \frac{E}{(1+\nu)} \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{D}_{1/e}^- \mathbf{t}_r. \quad (36-38)$$

Si possono pertanto valutare i vettori \mathbf{U}_P , \mathbf{U}_Q e \mathbf{U}_T delle incertezze sulle componenti delle TR. L'ennesimo elemento di tali vettori si ottiene facilmente dalla relazione:

$$\mathbf{U}_{X,n} = \max \left(\left| X_n^+ - X_n \right|, \left| X_n^- - X_n \right| \right). \quad (\text{con } \mathbf{X}=\mathbf{P},\mathbf{Q},\mathbf{T}) \quad (39)$$

Per ciascuna componente delle TR si può pertanto scrivere che il valore effettivo cade nel range di incertezza definito dalla (39), cioè risulta:

$$\mathbf{P}_{eff} = \mathbf{P} \pm \mathbf{U}_P; \quad \mathbf{Q}_{eff} = \mathbf{Q} \pm \mathbf{U}_Q; \quad \mathbf{T}_{eff} = \mathbf{T} \pm \mathbf{U}_T. \quad (40-42)$$

5. Effetti sulle TR calcolate

Le relazioni trovate ai capitoli precedenti permettono di stimare l'effetto del raggio di raccordo su una distribuzione qualsiasi di TR (costanti o variabili nello spessore). A titolo di esempio, in figura 4 sono mostrate le deviazioni che si hanno, a causa di un raccordo con raggio adimensionale $\rho=0.1$, in presenza di TR costanti (Fig. 4a) e TR variabili linearmente (Fig. 4b), analizzati con il metodo integrale utilizzando 6 passi costanti.

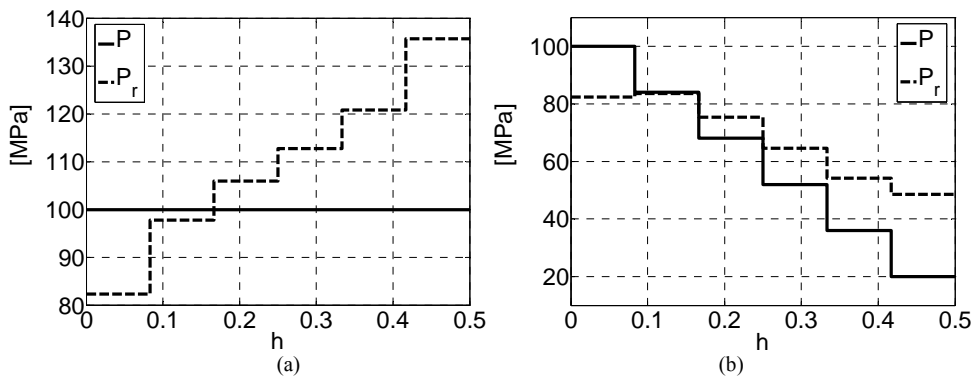


Figura 4 – Confronto tra TR effettive (P) e calcolate (P_r) in presenza di raccordo con $r=0.1$ e $d=0.4$: TR costanti (a) e lineari (b)

La figura 4a mostra che, per tensioni costanti, la presenza del raggio di raccordo causa errori che possono raggiungere il 35% del valore effettivo, mentre la figura 4b mostra come una differente distribuzione delle TR possa dare origine ad errori differenti. In particolare si osserva come il raggio di raccordo produce generalmente errori negativi ai primi passi, positivi agli ultimi passi. In altre parole in un diagramma $TR-h$ la curva delle TR calcolate (affette da errore) risulta generalmente ruotata in senso antiorario rispetto a quella effettiva.

Per le stesse distribuzioni di TR considerate in fig.4, la fig.5 mostra le relative bande d'incertezza considerando che il raggio di raccordo sia misurato (o stimato) con una incertezza $u_r=10\%$; si osserva come la banda di incertezza si allarga alle basse e soprattutto alle elevate profondità con errori assoluti sulle TR che in questo caso possono raggiungere i 4-5 MPa.

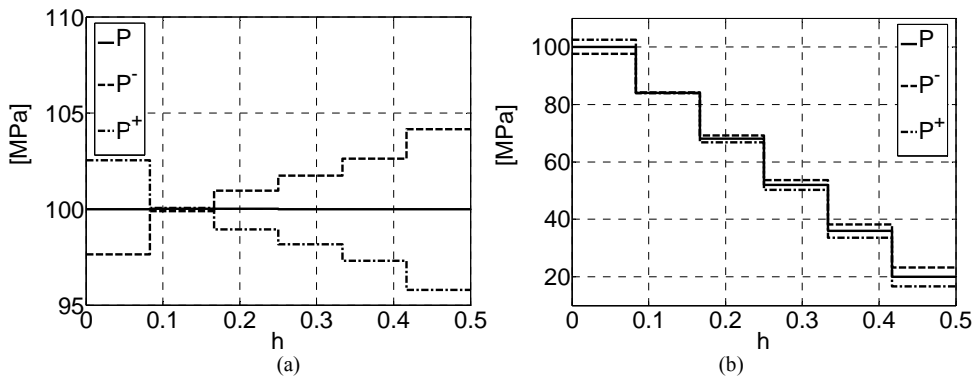


Figura 5 – TR effettive (P) e bande d'incertezza (P^- e P^+) relative ad una incertezza del raggio di raccordo $u_r=10\%$: TR costanti (a) e variabili linearmente (b).

6. Applicazione pratica

Al fine di verificare sperimentalmente la bontà dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche, il metodo di correzione proposto è stato applicato al caso delle TR simulate in una trave in alluminio ($E=100.9$ GPa, $\nu=0.3$) mediante flessione plastica [20]. Si tratta di una trave dello spessore di 5 mm strumentata con una rosetta MM EA-13-125 RE-120 con diametro medio $D_m=10.26$ mm, sulla quale è stato effettuato un foro di diametro 3 mm a bassa velocità. Per questo foro si ha un raggio adimensionale al fondo del foro $\rho=0.2$ circa.

La trave considerata è un elemento di piccolo spessore e per questo le matrici d'influenza sono state appositamente calcolate tramite il metodo agli elementi al contorno (codice commerciale *Beasy*[®]) [20].

In figura 6a è mostrata la componente di deformazione sperimentale p , la curva interpolante p_r e la curva corretta secondo la eq.(18), mentre in figura 6b sono mostrate le TR calcolate utilizzando il metodo integrale con 6 passi di foratura ottimizzati [8].

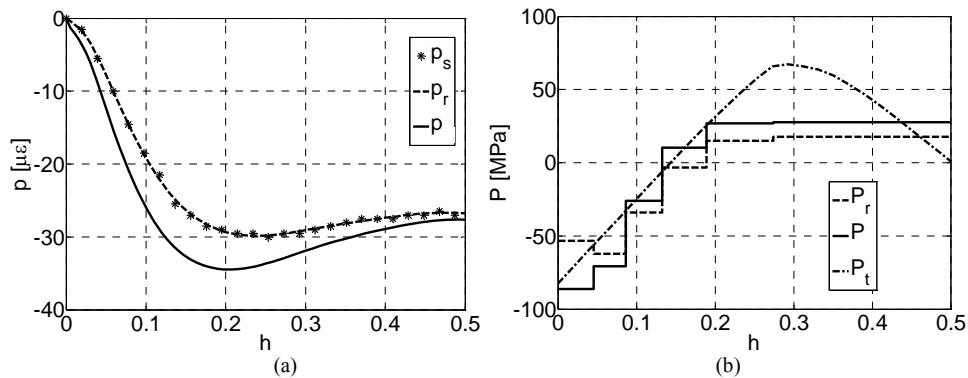


Figura 6 – (a) componente di deformazione sperimentale p_s , curva interpolante p_r e componente corretta p secondo la eq.(18); (b) componenti di tensione effettive (P_t), calcolate (P_r) secondo la eq.(1) e corrette (P) secondo la eq.(21).

La figura 6a mostra come a causa del raggio di raccordo le deformazioni subiscono una marcata correzione rispetto ai valori sperimentali. Queste correzioni si ripercuotono vistosamente sulle tensioni calcolate mostrate nella figura 6b; ad esempio, al primo passo la tensione calcolata passa da -53 MPa a -86 MPa con una correzione pari al 62%.

La figura 6b mostra anche che l'andamento delle TR corretto P descrive meglio l'andamento teorico rispetto alle tensioni non corrette P_r e cioè non solo ai primi passi dove si nota che la correzione elimina la variazione di pendenza erroneamente presente nelle P_r , ma anche alle elevate profondità ove il valore corretto delle TR approssima meglio i valori teorici imposti. Evidentemente la presenza di altri errori non corretti dà luogo agli scarti tra valori calcolati dopo correzione dell'effetto del raggio di raccordo e valori teorici imposti.

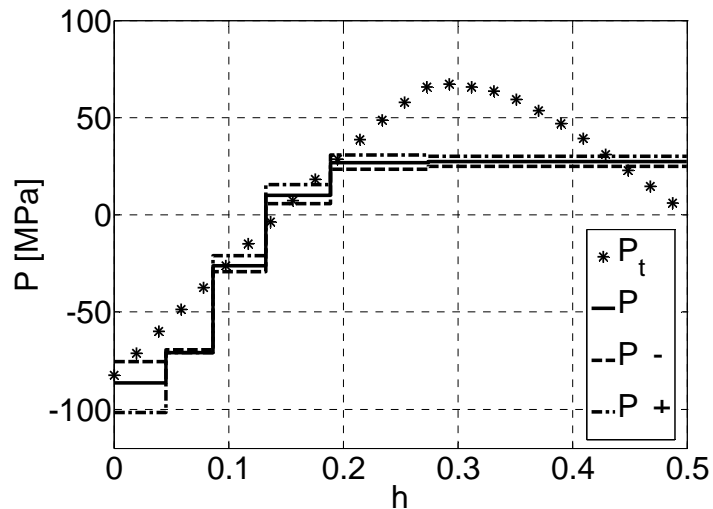


Figura 7 – Incertezza delle TR: P_t = teoriche, P = tensioni corrette dell'effetto del raggio di raccordo, $P-$ e $P+$ valori estremi relativi ad una incertezza di misura del raggio di raccordo del 20%.

In figura 7 è mostrato l'andamento della componente P delle TR calcolata tenendo conto del raggio di raccordo insieme alle distribuzioni P^- e P^+ relative ad una incertezza di $\pm 20\%$ sul valore del raggio di raccordo. I risultati mostrano come una tale incertezza sul raggio di raccordo implica in questo caso una incertezza sulle tensioni non superiore a 25 MPa.

7. Conclusioni

In questo lavoro è stato studiato l'effetto del raggio di raccordo al fondo foro sulla analisi delle TR con il metodo della rosetta forata. In particolare, tramite simulazioni numeriche sono stati determinati gli errori di cui sono affette le deformazioni misurate rispetto al caso ideale di assenza di raggio di raccordo.

I risultati delle simulazioni mostrano come, soprattutto alle basse profondità di foratura, si possono avere errori sulle deformazioni rilassate che possono raggiungere anche il 50% della deformazione ideale.

A partire dai risultati numerici è stata trovata una relazione semplice che lega direttamente gli errori sulle deformazioni ai principali parametri di influenza quali raggio di raccordo dimensionale r , rapporto D/D_m e profondità dimensionale del foro h .

Sono stati altresì studiati gli effetti che questi errori hanno sulla determinazione delle TR con il metodo integrale e la procedura da seguire per determinare la distribuzione corretta delle TR e l'incertezza associata alle TR in funzione della incertezza di misura (o stima) del raggio di raccordo.

Una applicazione sperimentale eseguita considerando dati indipendenti relativi ad una trave di alluminio sottoposta a flessione plastica, ha mostrato la efficacia della procedura di correzione proposta.

Bibliografia

- [1] *ASTM E837-01 Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*, ASTM International, (2001).
- [2] M. Bijak-Zochoski: *A semidestructive method of measuring residual stress*, VDI-Berichte, N. 313, (1978).
- [3] G. S. Schajer: *Application of finite element calculations to residual stress measurements*, Journal of engineering materials and technology, vol. 103, (1981).
- [4] G. Petrucci, B. Zuccarello: *A new calculation procedure for non-uniform residual stress analysis by the hole-drilling method*, J. of strain analysis, vol. 33, no. 1, (1998).
- [5] G. S. Schajer, M. B. Prime: *Use of inverse solutions for residual stress measurements*, Journal of engineering materials and technology, vol. 128, no. 3, (2006).
- [6] G. Petrucci, M. Scafidi: *Una nuova procedura per il calcolo delle tensioni residue con il metodo della rosetta forata basata sulla tecnica di Newton-Raphson*, XXXVI Convegno nazionale AIAS, (2007).
- [7] G. S. Schajer, E. Altus: *Stress calculation error analysis for incremental hole-drilling residual stress measurements*, J. of eng. mat. & tech., vol. 118, no. 1, (1996).
- [8] B. Zuccarello: *Optimal calculation steps for the evaluation of residual stress by the incremental hole-drilling method*, Experimental Mechanics, vol. 39, no. 2, (1999).
- [9] E. Valentini, D. Vangi: *Procedura di prova nella analisi delle tensioni residue nello spessore con il metodo della rosetta forata*, XXIV Convegno nazionale AIAS (1993).
- [10] A. Ajovalasit: *Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influence of hole eccentricity*, Journal of Strain Analysis, vol. 14, no. 4, (1979).

- [11] D. Vangi: *Residual stress evaluation by the hole-drilling method with off-centre hole: an extension of the integral method*, Journal of engineering materials and technology 119 (1997).
- [12] E. Valentini, A. Benincasa, M. Baggiani, S. Brogelli: *Evoluzione della tecnologia ad alta velocità per la valutazione delle tensioni residue con il metodo della rosetta forata*, XXXIV Convegno nazionale AIAS (2005).
- [13] M. T. Flaman: *Brief investigation of induced drilling Stresses in the centre-hole method of residual-stress measurement*, Exper. Mech., vol. 22, no. 1, (1982).
- [14] J. M. Boag, M. T. Flaman, J. A. Herring: *Considerations of using the hole drilling method for measuring residual stresses in engineering components*, in B. Young, Residual Stress in Design, Process and Materials Selection, Cincinnati, Ohio, (1987).
- [15] J. Lord: *Hole drilling techniques*, NPL, The NPL Materials Centre (2000).
- [16] H. T. Lee, W. P. Rehbach, F. C. Hsu, T. Y. Tai, E. Hsu: *The study of EDM hole-drilling method for measuring residual stress in SKD11 tool steel*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 149, no. 1-3, (2004).
- [17] – E. Valentini, M. Beghini, L. Bertini, D. Urso, A. Benincasa: *Banco prova a flessione per la determinazione delle incertezze associate alla misura delle tensioni residue con il metodo del foro*, XXXV Convegno Nazionale AIAS - Ancona (2006).
- [18] A. Niku-Lari, J. Lu, J. F. Flavenot: *Measurement of residual-stress distribution by the incremental hole-drilling method*, Experimental mechanics, vol. 25, no. 2, (1985).
- [19] J. N. Aoh, C. S. Wei: *On the improvement of calibration coefficients for hole-drilling integral method: Part II-experimental validation of calibration coefficients*, Journal of engineering materials and technology, vol. 125, no. 2, (2003).
- [20] R. Sgarioto: *Il metodo della rosetta forata: misura di tensioni residue variabili*, Tesi per il conseguimento della laurea in Ingegneria Meccanica, Università di Palermo, (a. a. 1996/97).