

AIAS – ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI

41° CONVEGNO NAZIONALE, 5-8 SETTEMBRE 2012, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

AIAS 2012 - 055

ANALISI DEGLI EFFETTI DEL CAMPO MAGNETICO SULLO STATO TENSIONALE INDOTTO IN PIASTRE DI ACCIAIO FORATE

G. Barbaraci^a, G. Marannano^b, G. Virzì Mariotti^c

Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica e Meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo,

^a e-mail: gabriele.barbaraci@unipa.it

^b e-mail: giuseppe.marannano@unipa.it

^c e-mail: gabriele.virzimariotti@unipa.it

Sommario

Si è considerata una piastra forata di materiale ferromagnetico opportunamente accoppiata da bobine di filo di rame smaltato alimentato da un alimentatore DC a 30V. Essa è stata analizzata agli Elementi Finiti e successivamente sono state eseguite sperimentazioni per la validazione dei risultati ottenuti. Dopo aver levigato la piastra sono stati installati due estensimetri per misurare la deformazione lungo l'asse x e lungo l'asse z . Si sono ottenuti i valori di deformazione di $5\mu\text{m}$ in direzione z e $-2\mu\text{m}$ in direzione x . Il confronto numerico-sperimentale mostra che i risultati di laboratorio sono più bassi di quelli numerici, mentre segni e ordini di grandezza sono gli stessi. Si conclude che i risultati dell'analisi FEM possono essere considerati accettabili a causa dell'ortogonalità del piano delle spire rispetto al piano della piastra e a causa del coefficiente di impacchettamento del rame.

Abstract

A perforated plate of ferromagnetic material suitably coupled by coils of enamelled copper wire fed by a DC power supply to 30V is considered in this paper. It has been analyzed with finite element and later experiments were performed to validate the obtained results. After polishing the plate two strain gauges for measuring the deformation along the x axis along the z axis were installed. There were obtained the values of deformation of $5\mu\text{m}$ in z direction and $-2\mu\text{m}$ in x direction. The experimental-numerical comparison shows that the laboratory results are lower than those numbers, while signs and orders of magnitude are the same. It is concluded that the results of the FEM analysis can be considered acceptable because the orthogonality of the plane of the coils relative to the plane of the plate and because of the packing coefficient of copper.

Parole chiave: induzione magnetica, piastra forata, deformazioni.

1. INTRODUZIONE

Dalla teoria è noto che una distribuzione generica di cariche produce un campo elettrico, mentre cariche elettriche in movimento (e le relative correnti) danno origine anche ad un campo magnetico. È anche noto che l'interazione elettrica e quella magnetica sono due aspetti diversi dell'interazione elettromagnetica. La forza dovuta al campo magnetico si determina sperimentalmente osservando la sua azione su diverse particelle in condizioni di moto differenti; si trova in questo modo la forza di Lorentz agisce solo su particelle dotate di carica e in moto con velocità v . L'evoluzione spaziale e temporale del campo magnetico è governata dalle equazioni di Maxwell, un sistema di quattro

equazioni differenziali alle derivate parziali lineari che sta alla base della descrizione formale dell'interazione elettromagnetica.

Nello spazio vuoto, in presenza di cariche q e di correnti di conduzione i , le equazioni Maxwell in forma integrale sono:

$$\begin{aligned} \oint \mathbf{E} \cdot \mathbf{u}_n d\Sigma &= \frac{q}{\epsilon_0} & \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} &= -\frac{d\phi(\mathbf{B})}{dt} \\ \oint \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_n d\Sigma &= 0 & \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} &= \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\phi(\mathbf{E})}{dt} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

La prima equazione stabilisce il legame tra carica elettrica e campo elettrico (*Legge di Gauss* per il campo elettrico); la seconda mostra che anche un campo magnetico variabile nel tempo è sorgente di un campo elettrico (*Legge di Faraday*); la terza equazione afferma che il campo magnetico è sempre solenoidale e che quindi non esistono cariche magnetiche libere cioè non esistono monopoli magnetici (*Legge di Gauss* per il campo magnetico); la quarta equazione infine individua come sorgenti del campo magnetico le correnti di conduzione e le variazioni temporali del campo elettrico (*Legge di Ampère-Maxwell*).

Supponendo che il campo magnetico cresca da 0 fino al valore H^* ; l'espressione dell'energia associata al campo magnetico finale H^* ha la seguente forma:

$$\epsilon_m = \frac{1}{2} \mu H^{*2} = \frac{1}{2} B^* H^* \quad (2)$$

Che ha le dimensioni di una pressione; la (2) è utile per individuare la tensione superficiale: l'energia associata al campo magnetico può essere interpretata come **pressione magnetostatica**.

I materiali ferromagnetici, quando sono sottoposti all'azione di un campo magnetico, subiscono la magnetostriazione cioè una sollecitazione meccanica con conseguente deformazione.

Scopo di questo lavoro è l'analisi degli effetti che il campo magnetico, generato da una bobina percorsa da corrente elettrica, ha sullo stato tensionale indotto in piastre di acciaio forate. Prendendo spunto dalle esperienze di Norio Hasebe, sono state svolte analisi magneto-strutturali su un modello tridimensionale utilizzando un software agli elementi finiti. Le tensioni di compressione che si vengono a creare all'interno delle piastre, migliorano la resistenza ai carichi statici e dinamici nella zona del foro.

2. DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI PERMEABILITÀ

Al fine di ottenere risultati più precisi sulla distribuzione del campo magnetico sono state considerate le caratteristiche non lineari delle proprietà dei materiali che costituiscono il modello. I materiali magnetici, in generale, sono caratterizzati da una permeabilità magnetica assoluta μ variabile in funzione del campo magnetico applicato. Il suo valore diminuisce all'aumentare del campo magnetico fino al raggiungimento del valore di saturazione B_{sat} , in corrispondenza del quale si ha $\mu = \mu_0$ ($\mu_r = 1$). Per descrivere il reale comportamento magnetico del materiale si è resa necessaria la definizione della curva caratteristica $B-H$, la cui pendenza in ogni punto è pari al valore di permeabilità assoluta:

$$\mu = \frac{\partial B}{\partial H} \quad (4)$$

essa è stata ricavata utilizzando un opportuno dispositivo chiamato “*apparecchio* (o “*giogo*”) di *Epstein*”, mostrato in fig. 1, utile per la valutazione delle perdite di energia, per isteresi e correnti parassite, che hanno sede nei materiali ferromagnetici quando gli stessi sono sede di flussi magnetici variabili nel tempo.

La *curva normale di magnetizzazione*, per la maggior parte delle leghe ferrose, è poco discosta dalla *curva di prima magnetizzazione* che caratterizza il materiale nel suo funzionamento in corrente continua. Per eseguire la prova sono state utilizzate 24 barre di acciaio C50 di dimensioni: 5x30x530 mm; sono state inserite 6 barre per ogni avvolgimento; le prove sono state eseguite presso il Laboratorio materiali del DIEETCAM dell'Università di Palermo.

Partendo da valore nullo, a mezzo di un *Variac* si aumenta la tensione di alimentazione del circuito, in modo da far variare la corrente da zero ad un valore massimo prestabilito, secondo intervalli regolari. Per la legge di Ohm si ha:

$$V = \dot{Z}I \quad (5)$$

L'impedenza è data da:

$$|\dot{Z}| = |R + j\omega L| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (6)$$

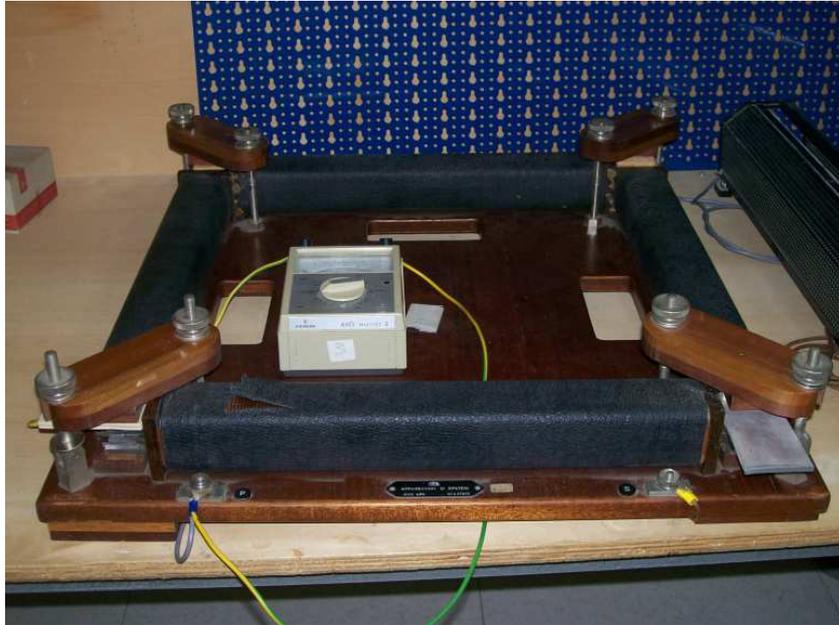


Fig. 1: Giogo di Epstein

Il valore di $R=0,9 \Omega$ è stato misurato preliminarmente in corrente continua a temperatura ambiente, aprendo il circuito primario e inserendo un ohmetro; dalla (6) è possibile ricavare il valore della reattanza induttiva ωL . Il basso valore della resistenza rispetto all'impedenza complessiva, fa prevedere che le modeste variazioni della resistenza al variare della temperatura di lavoro diano errori trascurabili nel calcolo dell'induttanza. si può calcolare la tensione applicata all'induttore:

$$V_L = X_L I \quad (7)$$

Per la legge di Faraday è possibile scrivere che:

$$f.e.m = -\frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

In termini fasoriali, questa f.e.m. coincide con l'opposto della tensione applicata all'induttore, quindi:

$$E = -j\omega\phi \quad (9)$$

Svolgendo gli opportuni passaggi si ottiene:

$$V_L = \omega\phi \quad \Rightarrow \quad \phi = \frac{V_L}{\omega} \quad (10)$$

il flusso unitario si ottiene dividendo per il numero di spire:

$$\phi_1 = \frac{\phi_T}{N} \quad (11)$$

il valore del campo magnetico B si ottiene da:

$$\phi_1 = BS \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\phi_1}{S} \quad (12)$$

dove S è la sezione trasversale della singola spira, sezione che può essere assimilata a quella del nucleo ferromagnetico. È possibile calcolare anche il valore dell'induzione H:

$$H = \frac{IN}{L_m} \quad (13)$$

In cui con L_m si è indicata la lunghezza media di tutto l'avvolgimento (2 m nel dispositivo adoperato). Noti B e H , è possibile ricavare il valore della permeabilità magnetica assoluta del materiale:

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (14)$$

Dividendo questo valore per la permeabilità magnetica nel vuoto μ_0 , è possibile calcolare il valore della permeabilità relativa dell'acciaio C50. La prova è stata eseguita facendo variare il valore dell'intensità di corrente da 0 a 15 A, i valori fissi sono riportati in tab.1.

Tab. 1 – Valori fissi della prova di permeabilità magnetica

μ_0 [H/m]	N (n. spire)	L_m [m]	S [m ²]	ω [rad/sec]	R [Ω]
1,26E-06	600	2	0,0009	314,1592654	0,9

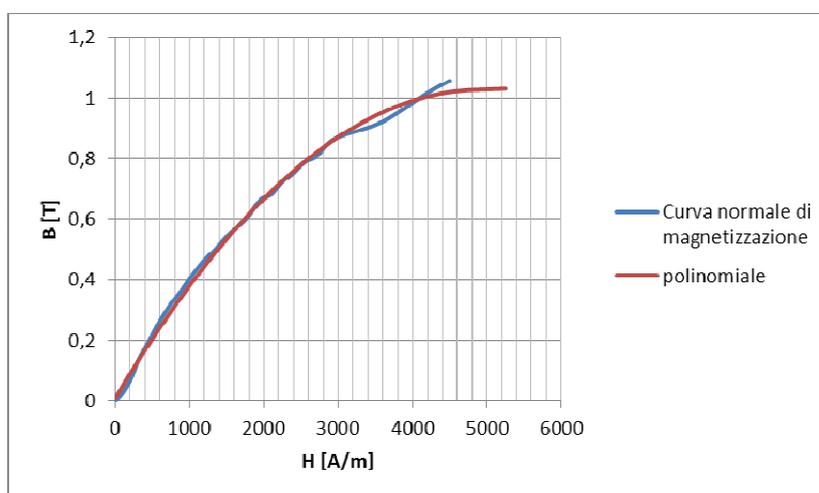


Fig. 2: Curva di normale magnetizzazione

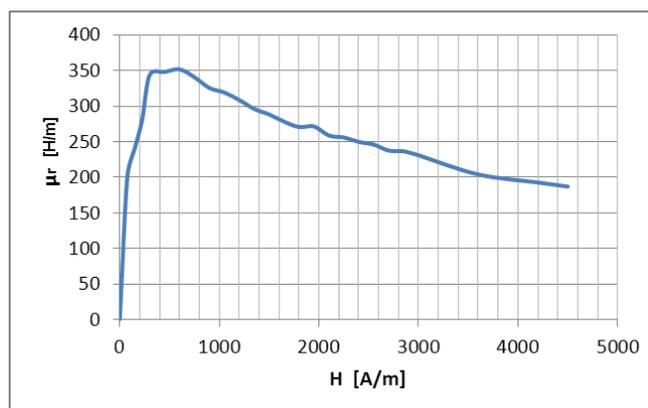


Fig.3 : Diagramma μ_r -H

L'andamento della *curva normale di magnetizzazione* (induzione magnetica in funzione del campo magnetico) è mostrato in fig. 2. La fig. 3 mostra la permeabilità relativa in funzione del campo magnetico, il cui valore massimo vale $\mu_r=351,52$: che si raggiunge in corrispondenza di una intensità di corrente di 2 A; raggiunto questo valore si entra nel ginocchio e il valore di permeabilità va decrescendo fino a raggiungere il valore minimo di $\mu_r=187,10$, che corrisponde ad una intensità di corrente di 15 A. La curva normale di magnetizzazione è stata approssimata con una polinomiale (fig. 2), comprendente anche la zona di saturazione del materiale, in modo da prendere un numero

maggiore di valori per l'input dell'analisi FEM. La permeabilità magnetica relativa del cilindro di aria che circonda la piastra è stata considerata costante e pari a 1.

L'analisi magnetico-strutturale agli elementi finiti è stata svolta per verificare che nella piastra siano presenti tensioni di compressione. Il software analizza la distribuzione di campo magnetico mediante le equazioni di Maxwell, che per un'analisi statica, indipendente dal tempo, sono descritte dalle seguenti equazioni:

$$\nabla \times H = J \qquad \nabla \cdot B = 0 \qquad (3)$$

nelle quali si è indicato con H l'intensità di campo magnetico, B la densità di flusso magnetico e J il vettore densità di corrente applicata. La risoluzione di tali equazioni, su un dominio definito da opportune condizioni al contorno, consente di valutare l'andamento del campo magnetico B e i valori di intensità magnetica H . Questi dati sono stati memorizzati ed utilizzati per effettuare la successiva analisi strutturale.

3. SIMULAZIONE NUMERICA

L'analisi magnetico-strutturale è stata condotta utilizzando il software in modalità *batch*, cioè senza far uso della classica interfaccia grafica. A tal fine sono state create due routines di analisi (uno per l'analisi magnetostatica e l'altro per quella strutturale), con le quali si sono fornite al software la sequenza delle istruzioni da eseguire, in fase di pre e postprocessing. Per il tipo di analisi effettuata e per la simmetria geometrica della struttura è stato rappresentato un quarto dell'intero modello. L'elemento per le analisi magnetiche è il *Solid96*, elemento solido a 8 nodi. Si è passati alla creazione delle bobine mediante un particolare comando, *Race*, che fa riferimento ad una macro che definisce una sorgente di corrente chiamata "pista" nel piano di lavoro. In Fig. 4 è riportata la geometria del modello FEM realizzato, con il particolare della mesh, nell'intorno del foro.

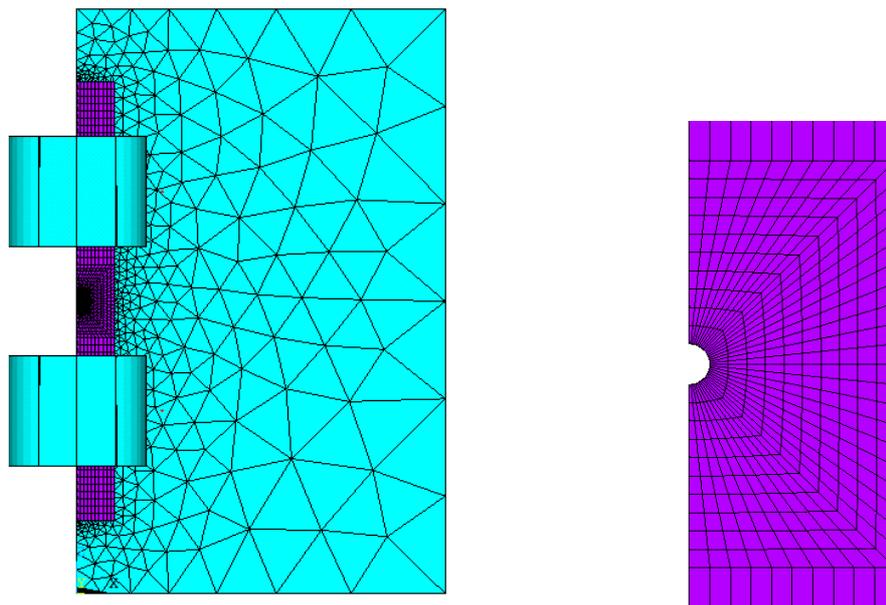


Fig. 4: Geometria del modello della piastra e delle bobine e particolare mesh attorno al foro (Pos. 3)

Una volta inserite le condizioni al contorno, si è ottenuto l'andamento delle linee di flusso del campo magnetico H e dell'induzione magnetica B . La fig. 5 ne mostra l'andamento nella zona del foro.

La piastra è stata incastrata alle estremità, poi sono stati applicati alla piastra i carichi magnetici ricavati dalla prima analisi e quindi è stata avviata l'analisi utilizzando la modalità *batch*. Le bobine sono disposte in maniera simmetrica rispetto al foro (sono poste una ad $\frac{1}{4}$ e l'altra a $\frac{3}{4}$ dell'altezza della piastra), sono stati selezionati nella piastra, in prossimità del foro, sei nodi: tre lungo la direzione dell'asse x e tre lungo la direzione dell'asse z (altezza piastra) mostrati in Fig. 6.

In corrispondenza di questi nodi sono stati ricavati i valori delle deformazioni; nei nodi 1,2 e 3 sono stati presi i valori di ϵ_z mentre nei nodi 4,5 e 6 sono stati rilevati i valori di ϵ_x . (tabella 2).

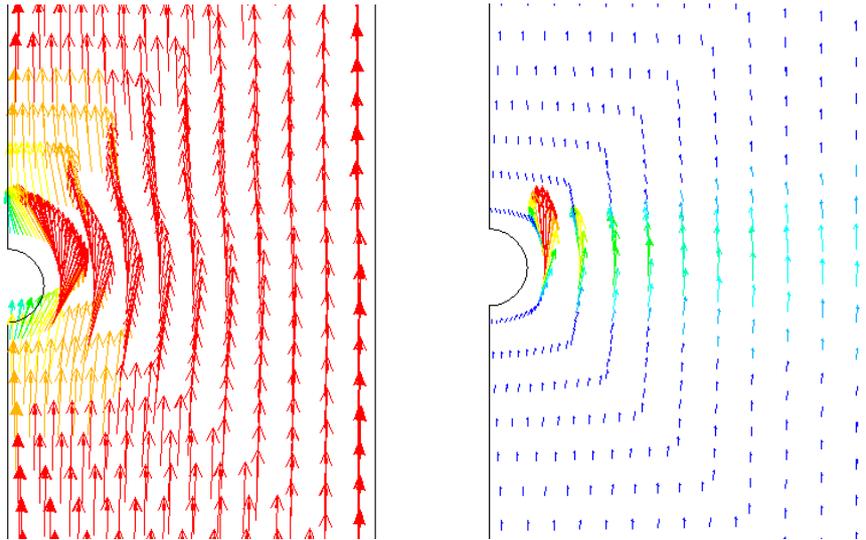


Fig. 5: Particolare foro: a sinistra linee di flusso del campo B; a destra line di flusso del campo di induzione magnetica H

4 PROVE SPERIMENTALI

Sono state condotte delle prove sperimentali per la validazione del risultato numerico. Durante le sperimentazioni si sono evidenziati quattro effetti:

- Magnetostrizione dell'oggetto di prova al quale l'estensimetro è legato;
- Magnetostrizione del materiale della griglia di misurazione;
- Effetto magnetoresistivo del materiale della griglia di misurazione;
- La presenza di tensioni elettriche indotte nell'estensimetro e nel suo circuito a causa di campi magnetici pulsanti o variabili.

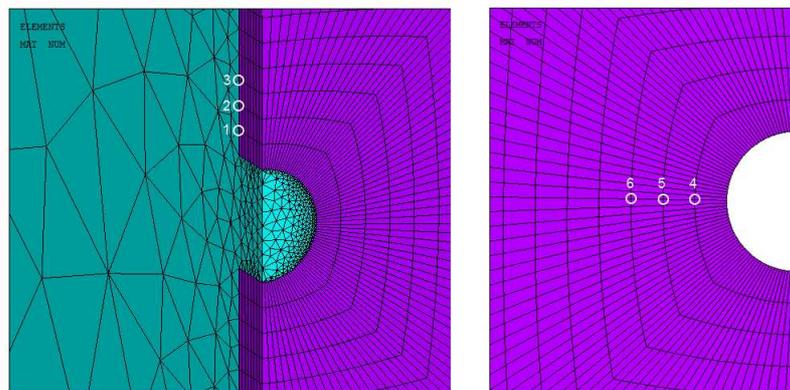


Fig. 6: Particolare foro con i nodi selezionati nelle diverse direzioni.

Tab. 2 – Valori della deformazione nei punti indicati in fig. 7

Nodi	ϵ_z [$\mu\text{m/m}$]	Nodi	ϵ_x [$\mu\text{m/m}$]
1	9,852	4	-7,953
2	9,427	5	-7,632
3	8,952	6	-6,893
media	9,410	media	-7,493

Ovviamente, in un materiale ferromagnetico esposto al campo magnetico, la magnetostrizione porta a dei cambiamenti nelle dimensioni dello stesso che influenzano gli estensimetri installati su di esso, provocando delle letture errate. Se l'estensimetro è costruito con una lega ferro magnetica

“isoelastica”, si nota che esso è fortemente influenzato dal campo magnetico; invece se esso è costruito in *Costantana*, è poco sensibile.

Per verificare che gli estensimetri utilizzati nella prova non fossero influenzati dal campo magnetico, è stata condotta una prova con due estensimetri a griglia singola con resistenza elettrica di 120 Ω installati su una piastra di plexiglass (fig. 7), avente le stesse dimensioni della piastra di acciaio successivamente utilizzata nelle prove; gli estensimetri sono: vishay L2a-06-250LW-120 per scopi generali. La variazione di resistenza dell'ER è stata misurata mediante il ponte di Wheatstone e il collegamento effettuato è quello ad un quarto di ponte.

È stata inserita la piastra nella bobina, costituita da due serie di avvolgimenti di filo di rame smaltato di diametro 1 mm, creata appositamente per simulare il campo magnetico. Ogni serie è costituita da 650 avvolgimenti (spire). Le estremità libere della bobina sono state collegate poi ad un alimentatore di corrente continua con tensione di 12 V e corrente di 5 A. Per fare in modo che gli estensimetri fossero completamente immersi nel campo magnetico la piastra è stata spostata leggermente a destra.

Una volta acceso l'alimentatore e quindi, fatta passare corrente nella bobina, è stato notato che sullo Strain Indicator non era segnato nessun valore di deformazione, quindi è stato possibile concludere che gli estensimetri non sono influenzati dal campo magnetico.

Si è passati alla misurazione delle deformazioni della piastra di acciaio C50, per il confronto con i valori ottenuti dall'analisi FEM. La piastra di acciaio è stata levigata nella zona circostante il foro e pulita in maniera accurata, quindi si è proceduto con l'installazione degli estensimetri; anche questa volta ne sono stati messi due nella stessa posizione di quelli installati nella piastra di plexiglass come mostrato in fig. 7. La misura è avvenuta con le stesse modalità; si sono ottenuti i seguenti valori di deformazione:

- l'estensimetro posto nella parte alta del foro con la griglia orientata secondo la direzione dell'asse z, ha dato una misura di deformazione pari a: $\varepsilon_z=5\mu\text{m}$
- l'estensimetro posto sull'estremità destra del foro con la griglia orientata secondo la direzione dell'asse x ha dato una misura di deformazione pari a: $\varepsilon_x=-2\mu\text{m}$

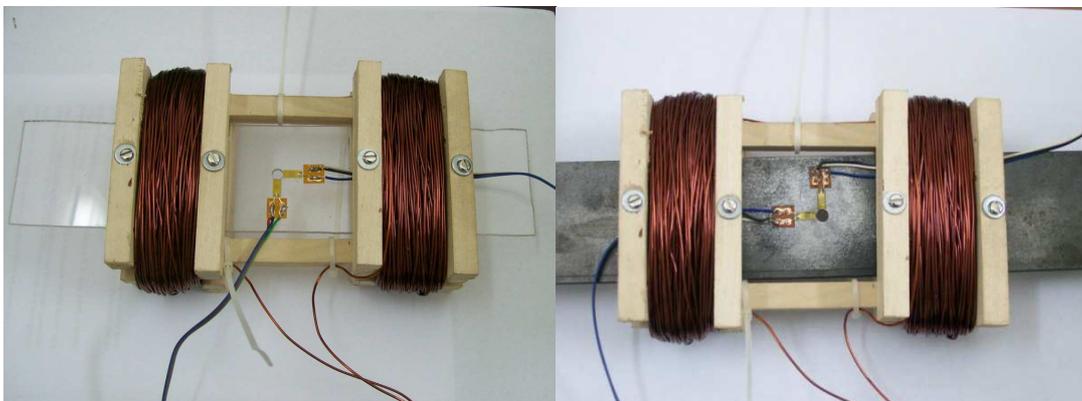


Fig. 7: Estensimetri installati sulla piastra

I valori misurati presentano gli stessi segni, lo stesso ordine di grandezza, solo sono più bassi di quelli ottenuti con l'analisi FEM. Questa differenza si può spiegare col fatto che nell'analisi FEM il piano delle spire è perfettamente perpendicolare al piano della piastra, inoltre le spire sono tutte perfettamente sovrapposte una rispetto all'altra; nella realtà invece, poiché l'avvolgimento delle spire è stato fatto a mano (anche se in maniera molto accurata), è possibile che il piano delle spire sia leggermente inclinato rispetto all'asse della piastra e inoltre non sono perfettamente sovrapposte. Tenendo conto di questa non perfetta coincidenza tra modello FEM e modello reale, è possibile considerare accettabili i valori ottenuti (anche se con un margine di errore).

La configurazione ottimale che permette di ottenere le massime tensioni di compressione nella zona circostante il foro può essere determinata cambiando la posizione delle bobine. Sono state eseguite altre analisi magnetiche modificando solamente la posizione delle due bobine:

- Pos. 1: le bobine sono state avvicinate il più possibile, in modo tale che le loro interfacce (quella superiore della bobina inferiore e quella inferiore della bobina superiore) si toccassero in

corrispondenza del diametro del foro, in modo che il foro sia completamente coperto dalle due bobine (fig. 8a)

- Pos. 2: le due bobine sono state allontanate posizionando le loro interfacce a una distanza totale pari al diametro del foro (fig. 8b)
- Pos. 3: è quella già mostrata in fig. 4
- Pos. 4: le bobine sono state allontanate il più possibile, in modo che la piastra sia sempre soggetta all'azione del campo magnetico (fig. 8c)

Lanciando le tre diverse analisi magnetiche e poi le corrispondenti analisi strutturali, è stato possibile ricavare i valori di tensione in corrispondenza degli stessi nodi visibili in Fig. 6. Di questi valori di tensione (σ_z per i nodi 1,2,3 e σ_z e σ_x per i nodi 4,5,6) è stata effettuata una media che è stata rapportata al valore medio di tensione calcolato negli stessi nodi, in riferimento alla pos. 3.

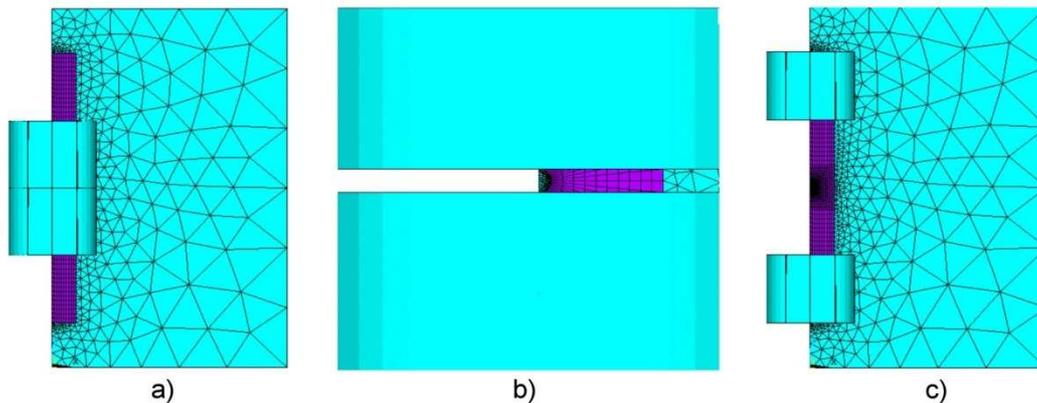


Fig. 8: Immagini modelli FEM modificati: a)pos. 1; b)particolare foro pos. 2; c) pos.4.

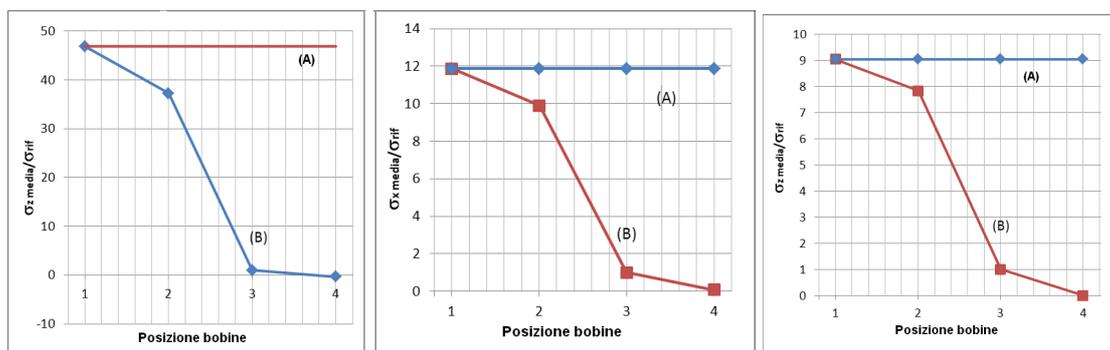


Fig. 9: a) Andamento delle tensioni medie di compressione σ_z calcolate nei punti 1,2 e 3 rapportate alla tensione media di riferimento; b) Andamento delle tensioni medie di compressione σ_x calcolate nei punti 4,5 e 6; c) Andamento delle tensioni medie di compressione σ_z calcolate nei punti 4,5 e 6.

In ascissa la posizione delle bobine: A)Bobina unica; B) due bobine.

È stata svolta anche un'analisi nella quale è stata inserita una sola bobina, invece di 2, nella stessa posizione delle bobine in fig. 8a 1, i corrispondenti risultati sono indicati con la lettera (A) nei grafici di fig. 9. Da essi si evince che la situazione migliore si ha mettendo o le due bobine come in Pos.1 oppure un'unica bobina.

Dalla fig. 9 a) si nota come la tensione media di compressione delle bobine in Pos.1 e della bobina unica sia quasi 50 volte superiore a quella di riferimento contro i quasi 40 della Pos. 2; con le bobine in Pos. 4 si rileva una piccola zona di trazione di entità poco inferiore allo 0,5.

Dalla fig. 9 b) si nota come la tensione media di compressione σ_x delle bobine in Pos. 1 e della bobina unica sia quasi 12 volte superiore a quella di riferimento; per la configurazione della Pos. 2 la tensione media di compressione risulta essere 10 volte superiore a quella di riferimento contro una tensione media di compressione quasi nulla per la configurazione della Pos. 4.

Dalla fig. 9 c), si nota come la tensione media di compressione σ_z delle bobine in Pos. 1 e della bobina unica sia 9 volte superiore a quella di riferimento contro i quasi 8 della Pos. 2 e una tensione media di compressione quasi nulla per la configurazione in Pos. 4.

5. RITARDO DELLA CRESCITA DELLA CRICCA

Nella zona che circonda il foro possono originarsi dei difetti che portano alla rottura del pezzo quando se raggiungono le dimensioni critiche. Per vedere come si propaga il difetto nell'intorno del foro, è stato eseguito uno studio numerico con le bobine in Pos. 3.

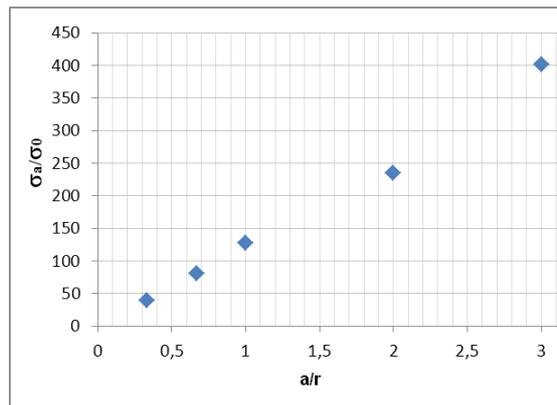


Fig. 10: Valori numerici del rapporto fra la tensione di compressione all'apice del difetto ed il valore della tensione al bordo del foro (in assenza di cricca) in funzione del rapporto a/r .

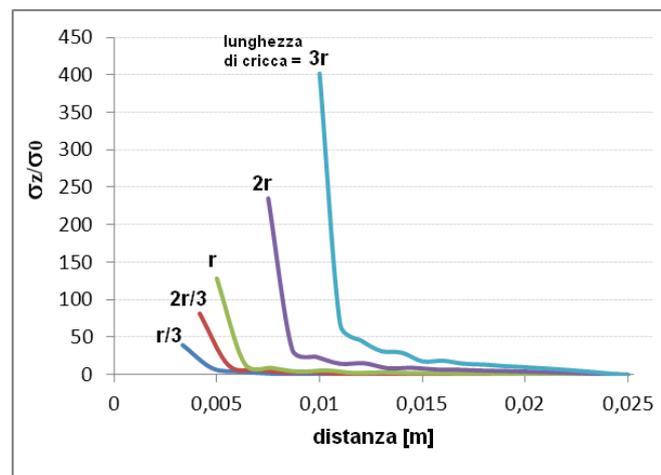


Fig. 11: Andamento del rapporto tra il valore della tensione di compressione lungo la linea compresa tra l'apice della cricca ed il bordo della piastra per diversi valori della lunghezza di cricca.

Per questo motivo è stata posta particolare attenzione alla realizzazione della mesh, che è regolare e abbastanza fitta in particolar modo nella zona del foro e della cricca. Sono state svolte diverse analisi facendo variare il rapporto a/r , essendo a la lunghezza della cricca ed r il raggio del foro. Avviando le varie analisi, magnetica prima e strutturale dopo, sono stati determinati i valori delle tensioni di compressione in corrispondenza dell'apice della cricca e poi sono stati rapportati al valore di tensione σ_0 nella configurazione del modello senza cricca. Plottando poi questi valori in funzione del rapporto a/r , si è ottenuto il grafico di fig. 10. Si nota come all'apice della cricca si riscontrano tensioni di compressione sempre maggiori all'aumentare della lunghezza, che arrivano a valori 400 volte superiori rispetto alla tensione di riferimento σ_0 . Successivamente sono stati selezionati nel modello tutti i nodi che partono dall'apice della cricca e arrivano alla fine della lunghezza della piastra. In

questi nodi il valore della tensione è stato rapportato al valore della tensione di riferimento σ_0 , ottenendo il grafico di fig. 11.

Si nota che la tensione di compressione all'apice della cricca sempre di più fino a raggiungere un valore quasi 400 volte superiore alla σ_0 , quando la cricca raggiunge una dimensione $a = 3r$. Per tutti gli andamenti il valore di compressione parte da un valore massimo e poi decresce, in un primo tratto linearmente e molto rapidamente fino ad un "ginocchio" per poi decrescere molto più lentamente fino al raggiungimento del valor nullo. Il tratto lineare è variabile in un range di valori compresi tra il 5% e il 10% della lunghezza totale per dimensione della cricca pari a $r/3 < a < 3r$.

6. CONCLUSIONI

Scopo di questo lavoro è lo studio dell'influenza della posizione delle bobine sulla generazione di tensioni di compressione nell'intorno del foro. La configurazione migliore in cui le bobine sono unite (posizionate sopra il foro) oppure, quando si utilizza una sola bobina. In tal caso si ha:

- la tensione media di compressione σ_z sui nodi selezionati lungo la direzione x raggiunge un valore di circa 9 volte superiore a quella di riferimento;
- la tensione media di compressione tensioni σ_x sui nodi selezionati lungo la direzione x raggiunge un valore 12 volte superiore a quella di riferimento;
- la tensione media di compressione σ_z sui nodi selezionati lungo la direzione z raggiunge un valore circa 50 volte superiore a quella di riferimento.

Nella simulazione dell'avanzamento di una cricca al bordo del foro. Svolgendo le varie analisi al variare della lunghezza della cricca, posizionando le bobine in posizione intermedia, si è notato che all'apice della cricca è sempre presente una forte tensione di compressione, crescente anch'essa con la dimensione della cricca.

È possibile affermare che la generazione di campi magnetici su materiali magnetostrittivi può generare campi di tensione che determinano miglioramenti alla resistenza all'avanzamento di difetti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hasebe, N, "Magneto stress analysis of a strip with a semi elliptical notch under uniform magnetic field" *International Journal of Engineering Science* 49 (9) , pp. 1019-1031 (2011)
- [2] Hasebe, N, "Magneto elastic stress subjected to uniform magnetic field over a thin infinite plate containing an elliptical hole with an edge crack" *International Journal of Solids and Structures* 48 (14-15) , pp. 2120-2130 (2011)
- [3] Hasebe, N, "Magneto-elastic stress in a thin infinite plate with an elliptical hole under uniform magnetic field" *Archive of Applied Mechanics* 81 (6) , pp. 745-764 (2011)
- [4] Hasebe, N, "Magnetic field and magneto elastic stress in an infinite plate containing an elliptical hole with an edge crack under uniform electric current" *International Journal of Solids and Structures* 47 (25-26) , pp. 3397-3411 (2010)
- [5] Hasebe, N, "Magneto-elastic stress induced by an electric current in an infinite thin plate with an elliptical hole" *Archive of Applied Mechanics* 80 (12) , pp. 1353-1370 (2010)
- [6] A. Ajovalasit, *Analisi sperimentale delle tensioni con gli estensimetri elettrici a resistenza*, ed. Aracne (2008).
- [7] Marannano G., Virzì Mariotti, G. Toscano C., "Effetto della pressurizzazione dei fori e dell'indentazione anulare sulla vita a fatica di provini in lega di alluminio", Atti 40° Convegno Nazionale AIAS, Palermo, 7-10 settembre (2011)
- [8] S. Pasta, G. Virzì Mariotti - Effect of Residual Stresses and Their Redistribution on the Fatigue Crack Growth in Cold-Worked Holes - International Conference on CRACK PATHS (CP2009), Vicenza (ITALY), September 23-25, 2009 ISBN 978-88-95940-28-1
- [9] V. Nigrelli, G. Pugliese, G. Virzì Mariotti – Hole expansion Effects on Fatigue Crack Growth – BSSM International Conference on Advances in Experimental Mechanics – Stratford on Avon, 27/29 August 2002