

STUDIO NUMERICO E SPERIMENTALE SULLA GENERAZIONE DEGLI ULTRASUONI TRAMITE SORGENTE LASER PUNTIFORME

D. Cerniglia, A. Pantano, C. Mineo

Università degli Studi di Palermo - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica, Meccanica, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail: donatella.cerniglia@unipa.it

Sommario

Si è condotto uno studio sperimentale e numerico sui campi ultrasonori generati nei materiali metallici tramite laser con sorgente puntiforme. L'energia ed il profilo del fascio, la durata dell'impulso, l'estensione e la forma dell'area irradiata influenzano l'ampiezza, la frequenza e la direzionalità degli ultrasuoni. Lo studio è stato sviluppato per il regime termoelastico, nel quale la radiazione laser di bassa densità di energia limita l'ampiezza degli ultrasuoni prodotti e quindi la sensibilità al rilievo di difetti in corpi estesi. Per aumentare il rapporto segnale-rumore si possono variare alcuni parametri. Lo studio sperimentale è stato condotto variando l'area di impatto, la distribuzione dell'energia laser nell'area e la direzione di ricezione. Con lo studio numerico si sono replicate le acquisizioni sperimentali, estendendo le analisi a misurazioni non eseguibili in laboratorio. I risultati di questo lavoro possono fornire una guida per la scelta della configurazione ottimale.

Abstract

An experimental and numerical study on the ultrasonic fields generated in metals by a point laser source has been done. Energy and profile of the beam, pulse duration, extent and shape of the irradiated area affect amplitude, frequency and directionality of the ultrasonic waves. The study has been developed for the thermoelastic regime, where the laser radiation with low energy density limits the amplitude of ultrasounds and therefore the sensitivity in detecting the defects in extended bodies. By controlling some parameters the signal-to-noise ratio can be increased. The experimental study has been conducted by varying the impact area, the distribution of the beam energy in the impact area and the receiving direction. The numerical analysis replicates the experimental acquisitions, extending the analysis to measurements that can not be handled in the laboratory. The results of this work may provide a guide for choosing the optimal configuration.

Parole chiave: ultrasuoni laser, propagazione di onde

1. INTRODUZIONE

I metodi di ispezione che utilizzano gli ultrasuoni sono efficaci ed affidabili per il rilevamento di difetti. Negli ultimi decenni l'interesse è stato rivolto verso le tecniche non a contatto, per i vantaggi che presentano rispetto all'impiego di tecniche convenzionali a contatto. In particolare, l'uso del laser nei sistemi di controllo ad ultrasuoni permette di effettuare ispezioni remote ed automatizzate, anche su oggetti in movimento, grazie alle caratteristiche della radiazione laser [1].

In questo lavoro si è condotto uno studio, sperimentale e numerico, sui differenti campi ultrasonori generati nei materiali metallici tramite laser, al fine di ottimizzare l'efficienza di generazione in relazione ad una particolare applicazione, utilizzando sorgenti puntiformi. Un fascio laser di elevata potenza diretto su una superficie solida produce onde elastiche con un meccanismo che dipende da molti parametri [2]. L'energia ed il profilo del fascio laser, la durata dell'impulso, l'estensione e la

forma dell'areola irradiata influenzano l'ampiezza, la frequenza e la direzionalità degli ultrasuoni prodotti.

Dopo un confronto tra il regime di generazione termoelastico e quello di ablazione, lo studio è stato sviluppato considerando il solo regime termoelastico, preferito per condurre prove non distruttive visto che non causa alterazione della superficie su cui incide il fascio laser. In tale regime la radiazione laser ha una bassa densità di energia che limita l'ampiezza degli ultrasuoni prodotti e, di conseguenza, la sensibilità al rilievo di difetti in corpi estesi. Per incrementare il livello del segnale ed aumentare il rapporto segnale-rumore si possono variare alcuni parametri. Lo studio sperimentale è stato condotto sia per le onde di volume che per quelle di superficie, rimanendo in regime termoelastico, variando l'area di impatto, la distribuzione dell'energia laser nell'area e la direzione di ricezione. Con lo studio numerico si sono replicate le acquisizioni sperimentali, consentendo inoltre di estendere le analisi a misurazioni non eseguibili in laboratorio.

Per la parte numerica si è utilizzata una tecnica sviluppata precedentemente [3], basata su un metodo di analisi dinamica esplicita, che consente di risolvere accuratamente problemi di propagazione di onde ultrasonore con frequenze nel campo dei MHz che viaggiano in corpi estesi.

2. ANALISI SPERIMENTALE

Le onde di volume e di superficie sono generate dal fascio laser, focalizzato sulla superficie piana di un provino semicilindrico, in acciaio, di raggio ed altezza 105 mm. Il fascio laser di 9 mm di diametro viene modificato in dimensione tramite l'uso di lenti sferiche. La Figura 1 mostra il setup con cui sono state eseguite le prove.

I segnali vengono acquisiti con un trasduttore piezoelettrico, con frequenza nominale di 1 MHz e larghezza di banda di 400 kHz a -6 dB. Il sensore è montato in un supporto che permette lo spostamento lungo la circonferenza e di mantenere la pressione di accoppiamento costante.

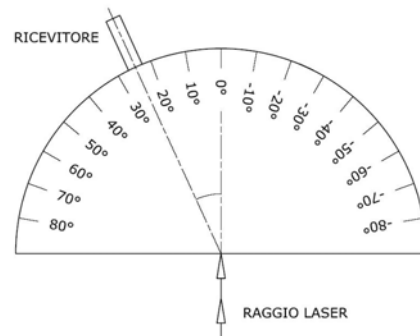
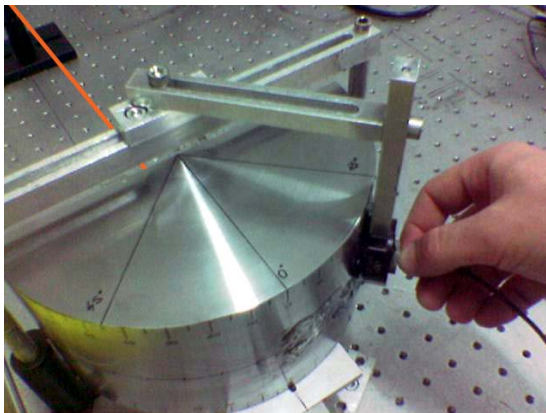


Figura 1: Setup con fascio laser focalizzato sulla superficie piana del provino e sensore posizionato per acquisire lungo la circonferenza.

Le prove sono eseguite in regime termoelastico e poiché la densità di energia assorbita deve rimanere al di sotto del limite che definisce il passaggio al regime di ablazione, l'area di incidenza utilizzata limita la massima energia utilizzabile. La Figura 2 mostra come diminuendo il diametro del fascio laser la regione relativa al regime termoelastico si restringe poiché l'area aumenta con il quadrato del suo diametro e produce la curva limite con andamento parabolico.

3. ANALISI NUMERICA

La letteratura sulla modellazione agli elementi finiti (FE) della propagazione di onde ultrasonore mostra un uso esteso dell'integrazione implicita delle equazioni del moto. Tuttavia, mentre vi sono diverse classi di problemi dove l'integrazione implicita è dal punto di vista computazionale più

efficiente dell'integrazione esplicita, ci sono ragioni tecniche che rendono l'integrazione esplicita più adatta nel simulare i problemi di propagazione di onde ultrasonore.

In lavori precedenti [3,4] abbiamo mostrato che l'analisi dinamica esplicita assieme all'uso di matrici di massa diagonali è molto più efficiente dal punto di vista computazionale rispetto alla procedura implicita per l'analisi di modelli di grandi dimensioni con tempi di risposta dinamica relativamente brevi, come nel caso dei problemi di propagazione di onde con frequenza nel range dei MHz che viaggiano in corpi relativamente estesi. Nelle procedure dinamiche esplicite la risoluzione temporale e spaziale delle simulazioni è di fondamentale importanza per la stabilità e per l'accuratezza della soluzione. Il limite di stabilità risulta essere il tempo impiegato dall'onda ad attraversare una distanza definita come la dimensione minima di un elemento: $\Delta t = L_{\min}/C_L$ dove L_{\min} è la più piccola dimensione degli elementi della mesh e C_L è la velocità dell'onda longitudinale.

Le onde con frequenza nel range dei MHz richiedono degli incrementi temporali molto piccoli per poter risolvere le loro componenti ad alta frequenza. Diversi ricercatori [5, 6] hanno mostrato che una soluzione accurata può essere ottenuta se $\Delta t \approx 1/20 f_{\max}$, dove f_{\max} è la più alta frequenza di interesse. Una risoluzione spaziale ragionevole per la propagazione di onde può essere ottenuta quando la dimensione degli elementi finiti è al massimo 1/10 della più piccola lunghezza d'onda da analizzare [5, 6]. Al fine di rispettare la risoluzione spaziale e temporale, nelle simulazioni eseguite si sono utilizzate mesh con 5 milioni di elementi tetraedrici lineari con spigoli di dimensione media di 0.7 mm. Poiché la velocità dell'onda longitudinale è di 5.96 mm/μs, l'algoritmo interno al software di simulazione ha dato luogo ad incrementi temporali in condizioni di stabilità dell'ordine di 10^{-8} , 10^{-9} s.

Il modello utilizzato per le analisi numeriche è un quarto del provino, sfruttando le condizioni di simmetria geometrica e di carico. Le proprietà del materiale usate per le simulazioni sono quelle relative all'acciaio del provino, riportate in Tabella 1.

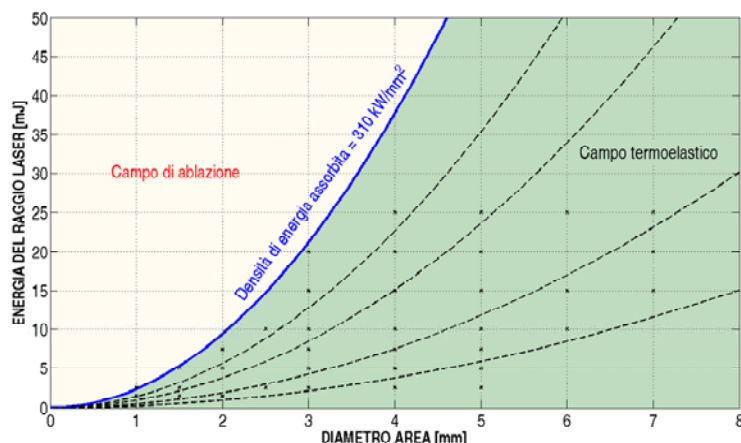


Figura 2: Regione termoelastica e di ablazione in funzione del diametro dell'area di incidenza del fascio laser. I punti marcati indicano le combinazioni di energia ed area usate per le prove.

Tabella 1: Proprietà dell'acciaio del provino

Modulo di Young (GPa)	E	210 (20°C) 145 (500°C)
Coefficiente di Poisson	ν	0.3
Densità (kg/dm ³)	ρ	7.86
Conducibilità termica (W/m)	k	50
Coefficiente medio di dilatazione termica ($10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	α	1.3 (20°C) 1.1 (500°C)
Calore specifico (J/kg · °C)	C	480 (20°C) 670 (520°C)
Velocità onda longitudinale (mm/μs)	C_L	5.96
Velocità onda di taglio (mm/μs)	C_S	3.24
Velocità onda di Rayleigh (mm/μs)	C_R	3.0

La validità del metodo esplicito utilizzato è stata dimostrata verificando i tempi di arrivo delle onde su un intervallo di 100 μs . Le simulazioni sono state effettuate considerando una sorgente circolare di 3 mm di diametro, su cui è applicato un flusso termico uniforme di 0.15 MW/mm^2 per 6 ns, che corrisponde ad un'energia totale irradiata dal laser di 10 mJ che viene assorbita per il 64% dalla superficie del provino, così come avviene negli esperimenti.

In Figura 3 sono confrontati i segnali relativi ad un angolo di ricezione di 80° . I segnali, sperimentale e numerico, pur essendo legati tra loro sono concettualmente distinti dal punto di vista dimensionale. Infatti, mentre il segnale acquisito dal sensore è elettrico, il segnale numerico rappresenta lo spostamento temporale del punto di ricezione. In secondo luogo, mentre la simulazione analitica fornisce le oscillazioni di un determinato nodo in un campo di frequenze molto grande, il sensore piezoelettrico usato è a banda stretta con frequenza centrale di 1 MHz. Tale causa d'influenza può essere rimossa applicando sul segnale numerico un filtro di banda basato sulla trasformata di Fourier, scegliendo come limiti di banda quelli propri del sensore utilizzato. Un'altra differenza tra i due segnali deriva dal fatto che viene confrontato lo spostamento temporale di un singolo punto con un segnale sperimentale ricavato tramite un sensore centrato in quel punto ma con un'area sensibile estesa.

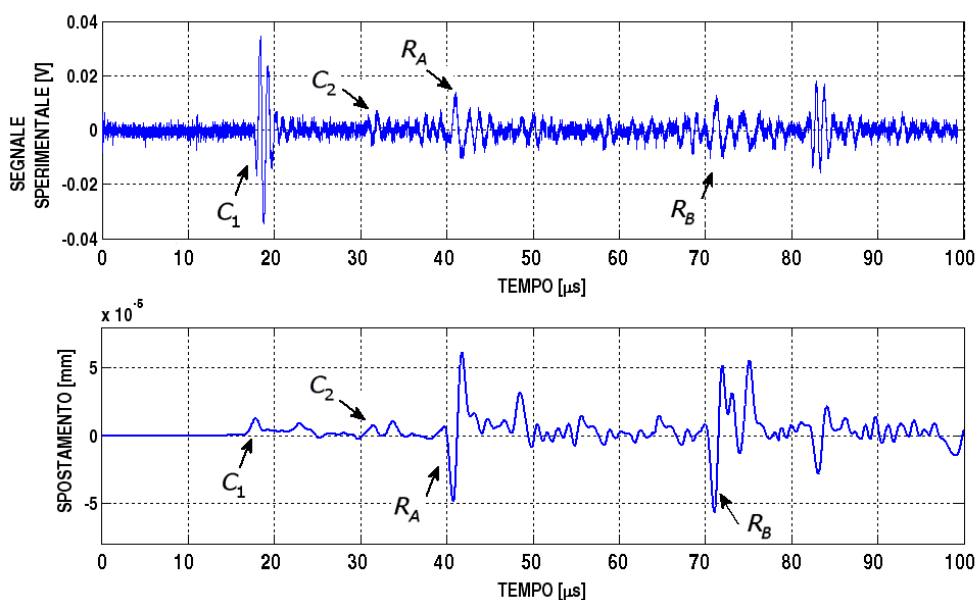


Figura 3: Confronto tra forma d'onda sperimentale e numerica, per un angolo di ricezione di 80° . C_1 onda longitudinale, C_2 onda di taglio, R_A e R_B onde di Rayleigh.

4. RISULTATI

Un primo studio è stato sviluppato per valutare la distribuzione del campo ultrasonoro al variare del diametro della sorgente circolare (2.5, 3, 4, 5 e 6 mm), mantenendo costante l'energia (10 mJ). Al variare dell'angolo di ricezione da 0° ad 80° , a passi di 5° , per i vari diametri, si è misurata l'ampiezza picco-picco dell'onda longitudinale. La Figura 4 riporta, per ciascun diametro, la curva interpolante i punti delle acquisizioni sperimentali. I risultati mostrano che all'aumentare del diametro della sorgente termoelastica, l'ampiezza del segnale diventa tanto più piccola quanto maggiore è l'area di incidenza, come atteso. Inoltre si è riscontrato uno spostamento del massimo della curva, in funzione dell'angolo, verso valori più piccoli dell'angolo di ricezione. Successive prove sperimentali fatte con fasci focalizzati, convergenti e paralleli, per i vari diametri, hanno portato all'ipotesi che la regressione del massimo potesse dipendere dalla distribuzione dell'energia nell'area di impatto.

Per verificare la correttezza di questa ipotesi sono state eseguite le simulazioni numeriche relative ad un'energia di 10 mJ, una durata dell'impulso di 6 ns e una sorgente circolare di diametro variabile (3, 4, 5, 6 e 20 mm). Inizialmente le analisi sono state eseguite ipotizzando una distribuzione uniforme dell'energia nell'area di impatto. Il flusso termico uniforme da applicare nelle simulazioni, per i vari

diametri della sorgente, corrispondente ai valori sperimentali della densità di energia, è indicato in Tabella 2.

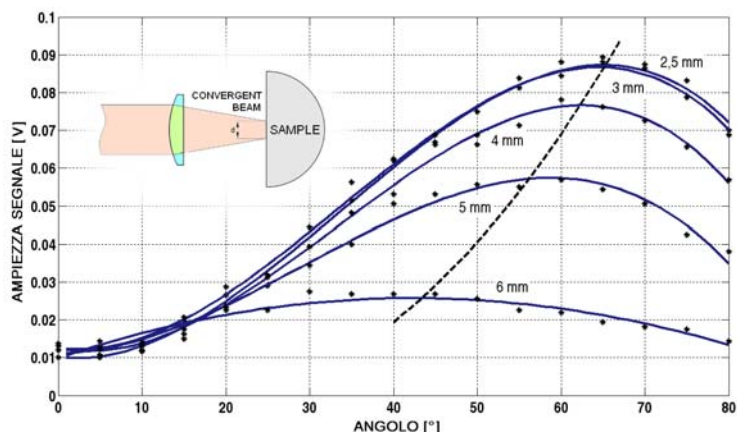


Figura 4: Ampiezza dell'onda longitudinale al variare dell'angolo di ricezione per diversi diametri dell'area irradiata da un fascio di 10 mJ. La curva tratteggiata interpola i massimi delle varie curve.

Tabella 2: Flusso termico (\dot{q}) al variare del diametro (d), per un fascio di 6 ns (τ) con energia 10 mJ (E) e superficie con coefficiente di assorbimento (α) del 64%.

d (mm)	$\dot{q} = \frac{E}{\tau \cdot (\pi d^2/4)} \alpha \left(\frac{\text{MW}}{\text{mm}^2} \right)$
3	0.15
4	0.085
5	0.054
6	0.038
20	0.003

Le simulazioni hanno fornito i risultati riportati in Figura 5, in cui le curve interpolano i moduli degli spostamenti misurati negli stessi punti di ricezione usati in fase sperimentale. Tali curve riproducono perfettamente la diminuzione dell'ampiezza dovuta al decremento della densità di energia, ma gli andamenti non presentano il fenomeno dello spostamento del massimo verso valori inferiori dell'angolo per le sorgenti con estensione da 3 a 6 mm. All'epicentro del provino (angolo di ricezione pari a 0°) l'ampiezza dello spostamento aumenta, mostrando un massimo per la sorgente di 20 mm, come se l'andamento del campo ultrasonoro si avvicinasse ad una componente di onda piana.

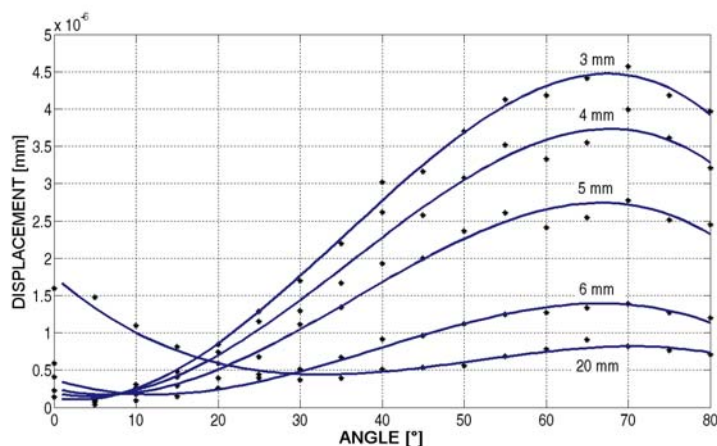


Figura 5: Spostamento relativo all'onda longitudinale al variare dell'angolo, valutato tramite analisi numerica per le diverse estensioni dell'area d'incidenza, applicando un flusso uniforme.

Le stesse analisi sono state eseguite ipotizzando una distribuzione dell'energia sull'area d'impatto di tipo gaussiana, che meglio approssima la densità d'energia di un fascio prodotto da un laser allo stato solido [1]. Nel modello FE utilizzato, l'areola d'impatto è stata divisa in un numero finito di corone circolari, in modo da approssimare la distribuzione continua di Gauss tramite una variazione discreta dell'energia applicata alle varie zone (Figura 6).

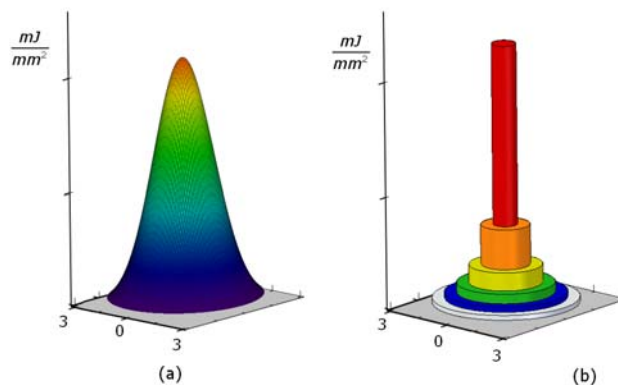


Figura 6: (a) Distribuzione gaussiana dell'energia che incide sull'area circolare di 6 mm di diametro e (b) discretizzazione della distribuzione gaussiana su sei corone circolari.

Conoscendo l'energia totale che incide sull'area d'impatto di dato raggio, nota l'espressione della curva normale di Gauss ed imponendo che nell'area giunga il 99% dell'energia del fascio laser, si ricava il valore della deviazione standard. Fissato poi il numero di anelli in cui si vuole suddividere l'area, si può calcolare la densità di energia da applicare a ciascuna zona.

Applicando questo procedimento alle aree da 3, 4, 5, 6 e 20 mm di diametro, sono state effettuate le analisi numeriche che tengono conto della distribuzione non uniforme dell'energia. Le curve dello spostamento dovuto all'onda longitudinale al variare dell'angolo, per i vari diametri, sono riportate in Figura 7.

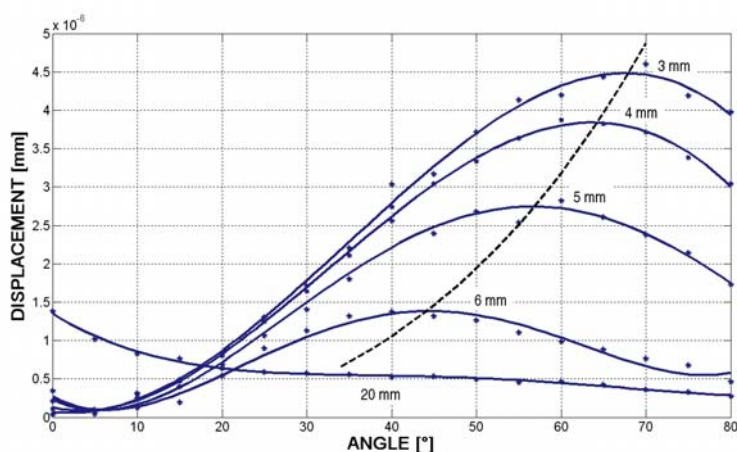


Figura 7: Spostamento relativo all'onda longitudinale al variare dell'angolo, valutata tramite analisi numerica per le diverse estensioni dell'area d'incidenza, applicando un flusso gaussiano.

Tali andamenti confermano che la causa della regressione del massimo è dovuta alla non uniformità dell'energia nella sezione del fascio laser. Tale disuniformità può essere trascurata per aree con diametro inferiore a 3 mm, ma non per diametri maggiori. Per la sorgente di 20 mm di diametro, la distribuzione angolare rimane quasi invariata rispetto al caso del fascio laser uniforme.

Sperimentalmente si è provato che usando prima una sorgente di 9 mm di diametro tramite un fascio non focalizzato di 50 mJ e poi interponendo lungo il percorso del fascio laser una maschera con un foro circolare di 2 mm di diametro, in modo da lasciare passare soltanto la parte centrale, quasi uniforme, del fascio laser si ha uno spostamento del massimo della caratteristica a 65° (Figura 8). La

curva ottenuta a seguito dell'introduzione della maschera ha ampiezze inferiori a causa della minore energia che complessivamente giunge sulla superficie del provino.

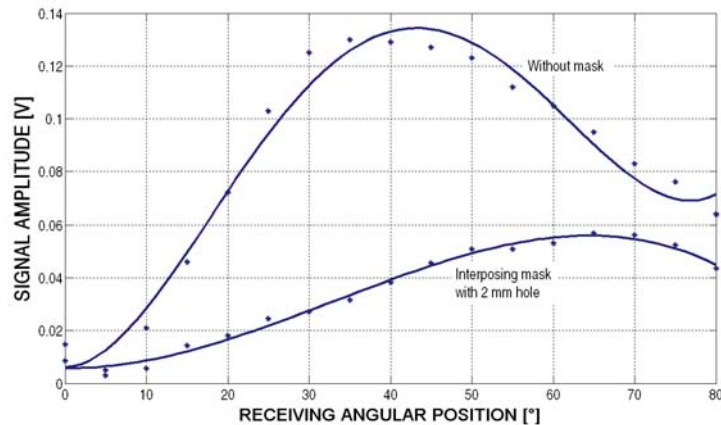


Figura 8: Spostamento relativo all'onda longitudinale al variare dell'angolo, valutato sperimentalmente con fascio non focalizzato di 9 mm e interponendo una maschera con foro di 2 mm.

5. CONCLUSIONE

Si è condotto uno studio sperimentale e numerico sui campi ultrasonori generati nei materiali metallici tramite laser, con sorgente puntiforme. L'energia ed il profilo del fascio, la durata dell'impulso, l'estensione e la forma dell'area irradiata influenzano l'ampiezza, la frequenza e la direzionalità degli ultrasuoni. Lo studio è stato sviluppato per il regime termoelastico, preferito per condurre prove non distruttive visto che non causa alterazione della superficie su cui incide il fascio laser.

Lo studio sperimentale è stato condotto variando l'area di impatto, la distribuzione dell'energia nell'area di impatto e la direzione di ricezione. Con lo studio numerico, effettuato tramite una tecnica basata su un metodo di analisi dinamica esplicita, si sono replicate le acquisizioni sperimentali, estendendo le analisi a misurazioni non eseguibili in laboratorio.

I risultati numerici e sperimentali indicano che all'aumentare della dimensione della sorgente circolare il massimo nella curva della distribuzione angolare dell'onda longitudinale si sposta da un valore di circa 65° verso angoli inferiori di ricezione. I risultati numerici hanno mostrato che la regressione del massimo dipende dalla distribuzione non uniforme dell'energia nel fascio laser e può essere trascurata per aree con diametro inferiore ai 3 mm.

I risultati di questo lavoro possono fornire un'ottima guida per la scelta della configurazione migliore, da usare in un sistema d'ispezione che sfrutti tutti i vantaggi della generazione d'ultrasuoni tramite laser.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer (1999).
- [2] C. B. Scruby, L.E. Drain, *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*, Adam Hilger (1990).
- [3] A. Pantano, D. Cerniglia, "Simulation of laser generated ultrasound with application to defect detection", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 91, 521-528, (2008).
- [4] A. Pantano, D. Cerniglia, "Simulation of laser-generated ultrasonic wave propagation in solid media and air with application to NDE", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 98, 327-336, (2010).
- [5] F. Moser, L. J. Jacobs, J. Qu, "Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method", *NDT&E International*, 32, 225-234, (1999).
- [6] B. Xu, Z. Shen, J. Wang, X. Ni, J. Guan, J. Lu. "Thermoelastic finite element modeling of laser generation ultrasound", *J. Appl. Phys.*, 99, 33508-1-33508-7, (2006).