

# Simulazioni ultrasonore finalizzate al dimensionamento del difetto

*Michele Carboni, Michele Sangirardi*  
*Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano*

## SOMMARIO

La simulazione numerica delle modalità di propagazione di onde ultrasonore fornisce ormai da tempo un importante ausilio agli operatori CND, soprattutto quando si cerchi di giudicare l'estensione di un difetto.

La memoria qui presentata si occupa in particolare di ricostruire le così denominate Creeping Waves, onde sub-superficiali talvolta indicate nella letteratura tecnica come utili a discriminare proprio la dimensione di cricche e difetti affioranti.

Utilizzando diverse tipologie di sorgente (array o monosonda inclinata) è stato possibile, operando con angoli di incidenza maggiori dei valori critici dei materiali, verificare innanzitutto l'effettivo sviluppo di questo tipo di onde. Successivamente, sfruttando il peculiare comportamento di queste componenti di risalire il fianco della discontinuità per diffrangersi sull'apice della stessa, se ne sono osservate le capacità operative nel caso di difetti affioranti in posizione "Inner Diameter" e "Outer Diameter". Infine, se ne sono compresi meglio i limiti, ad esempio: nei confronti delle componenti superficiali pure (onde di Rayleigh), le Creeping Waves hanno evidenziato una minore profondità di ispezione.

Le simulazioni effettuate hanno confermato sia il consistente vantaggio legato all'impiego di array di sonde, sia quello derivante dall'uso delle Creeping Waves, ma hanno anche messo in particolare evidenza la necessità di applicare approcci combinati fra varie tecniche per un miglior dimensionamento del difetto.

## 1. Introduzione

L'evoluzione dei moderni mezzi di calcolo, sia sotto l'aspetto hardware sia sotto quello software, sta continuamente ampliando le possibilità di applicazione anche di tecniche ormai consolidate [1] come i controlli non distruttivi. In particolare, nel settore degli ultrasuoni queste nuove possibilità si stanno manifestando soprattutto in relazione a:

- disponibilità di pacchetti software per la simulazione del fenomeno caratterizzati da sufficiente versatilità;
- controllo di sorgenti più evolute e dedicate a particolari applicazioni;
- sorgenti multiple gestite da calcolatore;
- ricostruzione complessa da pluralità di ecogrammi con riconoscimento della polarizzazione.

Si è quindi oggi nella condizione di poter affrontare problemi precedentemente accantonati perché di difficile soluzione e di poter ottenere risposte soddisfacenti man mano che nuove proposte applicative si vanno aggiungendo.

Nella presente memoria è stato approfondito, dal punto di vista applicativo, l'annoso problema del dimensionamento dei difetti [2-4], cui i tecnici nel campo degli ultrasuoni hanno cercato di fornire un contributo essenziale per il progetto o la verifica a sopravvivenza di strutture meccaniche. In particolare, ci si è occupati qui di ricostruire le modalità di propagazione per sorgenti inclinate sotto il primo angolo critico, quelle che per gli angoli prossimi a  $90^\circ$  emettono anche le cosiddette "Creeping Waves" (CW) [5-7], onde longitudinali sub-superficiali, talvolta indicate nella letteratura tecnica come utili a discriminare proprio la dimensione di cricche e difetti affioranti. L'argomento verrà affrontato utilizzando diverse tipologie di sorgente (array o monosonda inclinata) e osservando le capacità operative nel caso di difetti affioranti in posizione "Inner Diameter" (ID) o "Outer Diameter" (OD).

Le simulazioni effettuate hanno confermato sia il consistente vantaggio legato all'impiego di array di sonde, sia quello derivante dall'uso di angoli inferiori al primo critico, ma hanno anche riconfermato la necessità di applicare approcci combinati fra varie tecniche per un miglior dimensionamento del difetto.

## 2. Pacchetti software per simulazioni ultrasonore

Pur partendo da fondamenti comuni (le equazioni di equilibrio elasto-dinamiche), le principali proposte disponibili per la simulazione delle propagazioni ultrasonore si differenziano sia per i metodi numerici risolutivi, sia per le strategie di calcolo e per la praticità di gestione dei dati: geometria, caratteristiche dei materiali, sorgenti.

Uno dei primi software di simulazione numerica per propagazioni ultrasonore, tuttora un punto di riferimento anche per altri applicativi, è EFIT (Elastodynamic Finite Integration Technique) [8], strumento 2D (è segnalata anche una versione 3D) di applicazione generale adottato anche per lo studio critico delle CW: esso opera con integrazioni successive su volumi finiti. L'EFIT non risulta essere commercializzato né liberamente disponibile in rete.

Considerando i pacchetti commerciali, tra i più diffusi si trovano due tipologie aventi caratteristiche interessanti:

- Wave 2000 Pro [9] ha una impostazione formale simile ad EFIT, ma il metodo risolutivo è quello delle differenze finite e anch'esso è 2D (la versione 3D è denominata Wave 3000 Pro). Nell'uso pratico si scopre che la modellazione geometrica è piuttosto macchinosa, basata sulla composizione di figure semplici quali rettangoli ad ellissi, che possono essere roto-traslate. E' comunque possibile considerare anche figure geometriche complesse mediante l'importazione delle coordinate dei vertici o dei punti delle curve da file ASCII esterni. A ciascuna delle parti geometriche possono poi essere attribuite caratteristiche acusto-elastiche uniformi e rappresentative del comportamento di vari materiali (aria, acciaio, plexiglas, alluminio,...).
- CIVA [10] è un pacchetto di simulazione 3D che mostra migliori caratteristiche di adattamento alla varietà delle situazioni reali e anche una capacità di ottimizzazione della quantità di memoria richiesta dal calcolo; infatti nel modo di operare di CIVA non tutto il campo ultrasonoro è descritto con lo stesso grado di accuratezza, ma è possibile selezionare alcune zone di maggiore interesse, dove le capacità di calcolo sono più proficuamente spese. La parte di modellazione geometrica è certamente più evoluta dando modo di ricostruire agevolmente geometrie complesse delle sorgenti e del pezzo. Resta comunque da stabilire quanto la rappresentazione grossolana del campo ultrasonoro nel percorso fino a raggiungere la zona di più accurata descrizione e i fenomeni di interfaccia tra queste due zone possano incidere sui risultati della simulazione.

In questa sede si è optato di circoscrivere l'analisi al campo bidimensionale adottando per la ricerca Wave2000 Pro v.2.2, in quanto una scelta diversa avrebbe presupposto la disponibilità di componenti hardware ad elevatissime prestazioni nella pratica non facilmente reperibili. Come validazione di Wave2000 Pro 2.2 sono state svolte una serie di simulazioni i cui risultati sono stati confrontati con analoghi [11] ottenuti mediante EFIT.

### **3. Simulazioni di propagazioni sotto il primo angolo critico**

In via preliminare, le capacità di simulazione del pacchetto d'elaborazione Wave 2000 Pro sono state sottoposte a vari test. Se ne riportano di seguito solo alcuni, selezionati tra quelli per i quali si trovano condizioni di lavoro non banali e che hanno poi permesso successive valutazioni per il dimensionamento dei difetti:

- propagazione ultrasonora generata da sorgente monosonda inclinata, angolo di rifrazione  $70^\circ < \alpha < 80^\circ$ , per osservare le CW longitudinali, la componente trasversale e le superficiali;
- propagazione ultrasonora generata da sorgente array lineare a sedici elementi con angolo di deflessione ("steering")  $70^\circ < \alpha < 80^\circ$ , per osservare anche in questa disposizione le CW longitudinali, la componente trasversale e le superficiali.

Sia la monosonda, sia l'array sono stati idealmente utilizzati per l'ispezione di un blocchetto di acciaio al carbonio (velocità onde longitudinali pari a 5900 m/s e velocità onde trasversali pari a 3200 m/s) di dimensioni 60x40 mm.

### 3.1. Propagazione ultrasonora da sorgente monosonda inclinata

La sorgente monosonda è stata modellata con lunghezza pari a 10 mm (dimensione sufficiente a generare un fronte d'onda piano) e frequenza di eccitazione pari a 4 MHz. Essa è stata inclinata rispetto alla superficie di ingresso ed immersa in uno zoccolo in plexiglas (velocità onde longitudinali pari a 2700 m/s e velocità onde trasversali pari a 1100 m/s) con angolazione opportuna in modo da generare l'angolo di rifrazione voluto (Fig. 1a). In particolare, gli angoli considerati sono stati  $20^\circ$ ,  $25,5^\circ$ ,  $26,2^\circ$  e  $30^\circ$  ai quali corrispondono angoli di rifrazione delle onde longitudinali in acciaio rispettivamente pari a  $\approx 40^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $74^\circ$  e  $80^\circ$ . Il ricevitore, separato dalla sorgente, è stato posto sulla faccia destra del blocchetto in prossimità della superficie superiore in modo tale da ricevere inequivocabilmente le differenti tipologie di onde superficiali.

E' interessante inoltre notare che WAVE2000 Pro è in grado di discriminare onde a polarizzazione longitudinale e trasversale. Nelle simulazioni è stato adottato un impulso ultrasonoro di tipo sinusoidale gaussiano smorzato (Fig. 1b); la durata totale delle simulazioni è stata pari a  $30 \mu\text{s}$ .

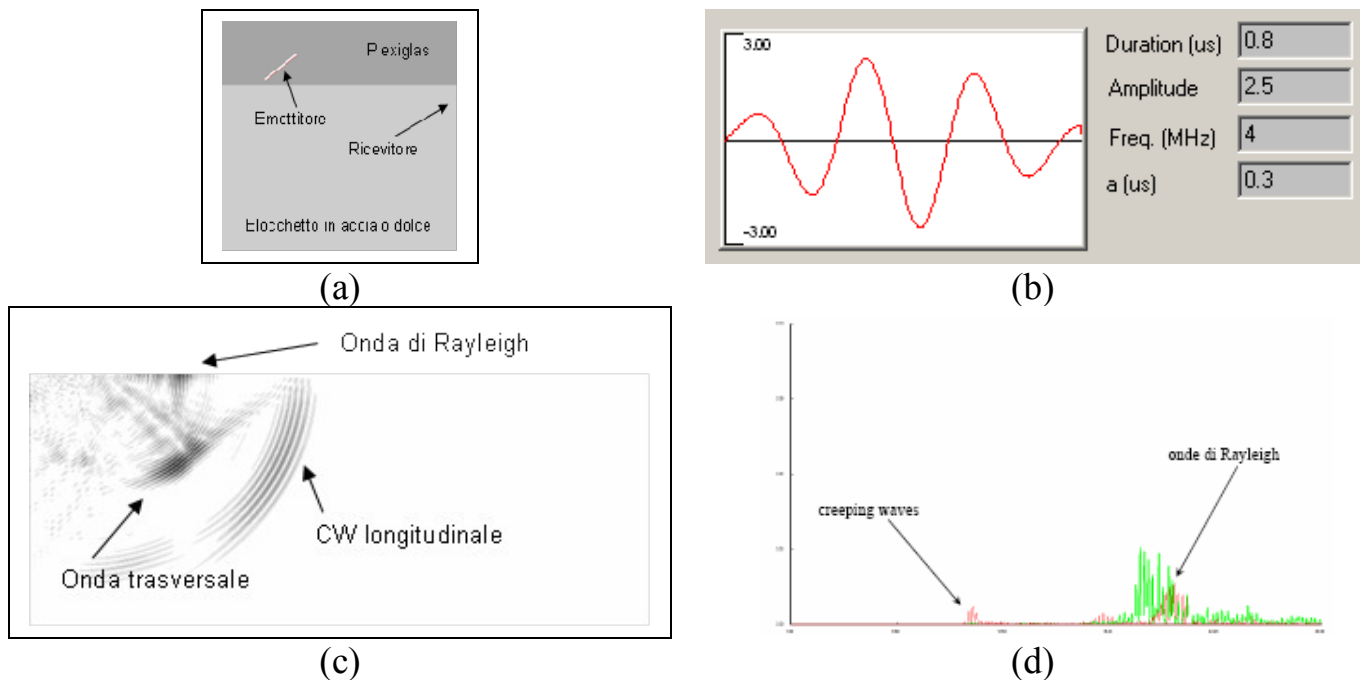


Figura 1 – Propagazione ultrasonora da sorgente monosonda inclinata: a) modellazione geometrica del sistema analizzato; b) parametri caratteristici dell'impulso ultrasonoro; c) fronti sonori sviluppati con angolo di rifrazione pari a  $74^\circ$ ; d) A-Scan rilevato dal ricevitore per angolo di rifrazione pari a  $74^\circ$  (in rosso: onde longitudinali; in verde: onde trasversali).

Analizzando i risultati ottenuti, è innanzitutto necessario osservare (Fig. 1c) la capacità di Wave2000 Pro nel cogliere fedelmente la manifestazione delle tre componenti sonore principali previste.

La migliore risposta alle cosiddette CW è stata comunque ottenuta adottando un angolo di rifrazione delle onde longitudinali pari a  $74^\circ$ . In particolare, l'andamento del fronte d'onda CW si osserva chiaramente in Fig. 1c dove è possibile anche apprezzare la presenza di onde trasversali corrispondenti alle onde di Rayleigh, in ritardo rispetto alle CW e di maggior intensità (come si può notare dall'A-Scan mostrato in Fig. 1d); come ci si aspetta

dalla teoria [5], l'intensità delle onde CW è risultata diminuire durante l'attraversamento del blocchetto così giustificando la bassa ampiezza rilevata dal ricevitore del segnale corrispondente.

### 3.2. Propagazione ultrasonora da sorgente array lineare

L'interesse della simulazione di una sorgente array lineare si pone nell'ambito dell'analisi dei cosiddetti sistemi "phased array" [12-13] ovvero sonde composte da una matrice di elementi adiacenti tra loro, ognuno dei quali è un trasduttore singolo di piccole dimensioni.

In questa sede è stato considerato un array di sedici elementi di dimensione pari a 1 mm, distanti 0.1 mm (Fig. 2). La forma dell'impulso e la durata delle simulazioni sono state modellate esattamente come nel caso monosonda, così come la stessa posizione è stata assegnata al ricevitore.

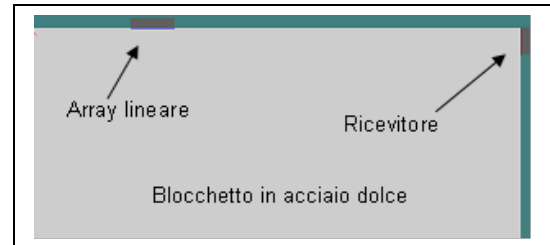
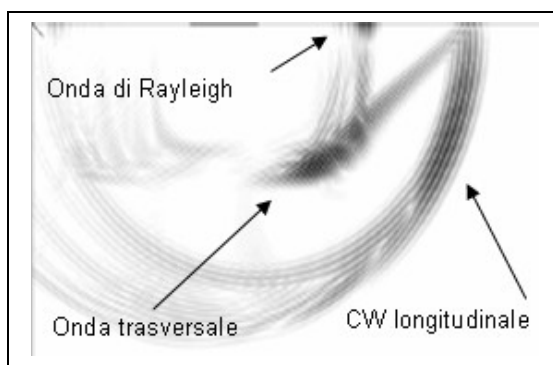
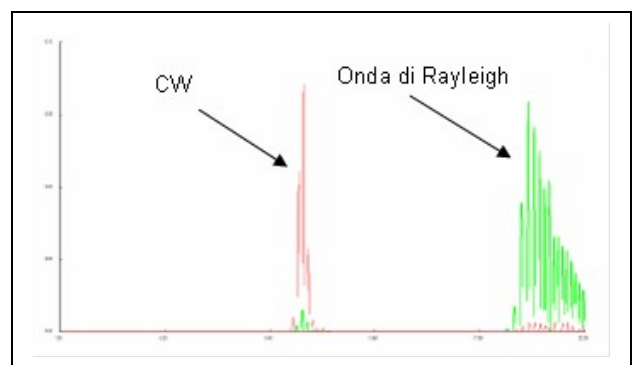


Figura 2 – Modellazione geometrica del sistema analizzato con array lineare.

Sono, infine, stati considerati gli stessi angoli di analisi:  $\approx 40^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $74^\circ$  e  $80^\circ$ . E' però necessario notare che in questo caso essi sono stati ottenuti mediante deflessione del fascio (angolo nominale di "steering") basato su un'opportuna legge di eccitazione dei singoli cristalli dell'array, senza la necessità di alcuno zoccolo in plexiglas. In Figura 3 sono riportati i risultati ottenuti con angolo di deflessione pari a  $74^\circ$ , per il quale si sono ricevute le maggiori ampiezze della componente CW.



(a)



(b)

Figura 3 – Propagazione ultrasonora da sorgente array lineare: a) fronti sonori sviluppati con angolo di deflessione pari a  $74^\circ$ ; b) A-Scan rilevato dal ricevitore per angolo di rifrazione pari a  $74^\circ$  (in rosso: onde longitudinali; in verde: onde trasversali).

Come si nota da Fig. 3a, la morfologia delle onde generate è molto simile a quelle ottenute con sorgente monosonda. Ciò che cambia in realtà è la distribuzione dell'intensità nelle due situazioni messe a confronto, perché nel caso della monosonda vi è una attenuazione interna al blocchetto di plexiglas che manca nell'array.

Considerando il caso di angolo di deflessione pari a  $80^\circ$  è stato possibile osservare che mentre le analisi con monosonda indicano che le CW non possano formarsi per angoli superiori a  $75^\circ$ - $76^\circ$ , con l'uso di array è stato possibile osservarle anche per angoli sino a

90°. I risultati ottenuti con l'array sono poi stati direttamente confrontati con quelli riportati in [11] evidenziando in generale un buon accordo.

Qualche ulteriore osservazione è necessaria: i) gli angoli di allineamento della intensità massima sono risultati in generale minori di quelli impostati di steering: ad esempio, è stato osservato, mediante una successione di ricettori monocristallo da 1 mm spaziate di 0.5 mm (Fig. 4a), che per steering impostato a 90° il massimo della pressione sonora corrisponde a 74° in prossimità della sorgente e varia leggermente secondo legge quasi parabolica allontanandosene (Fig. 4b); ii) per angoli di steering superiori a circa 74° il massimo di intensità longitudinale praticamente non si sposta.

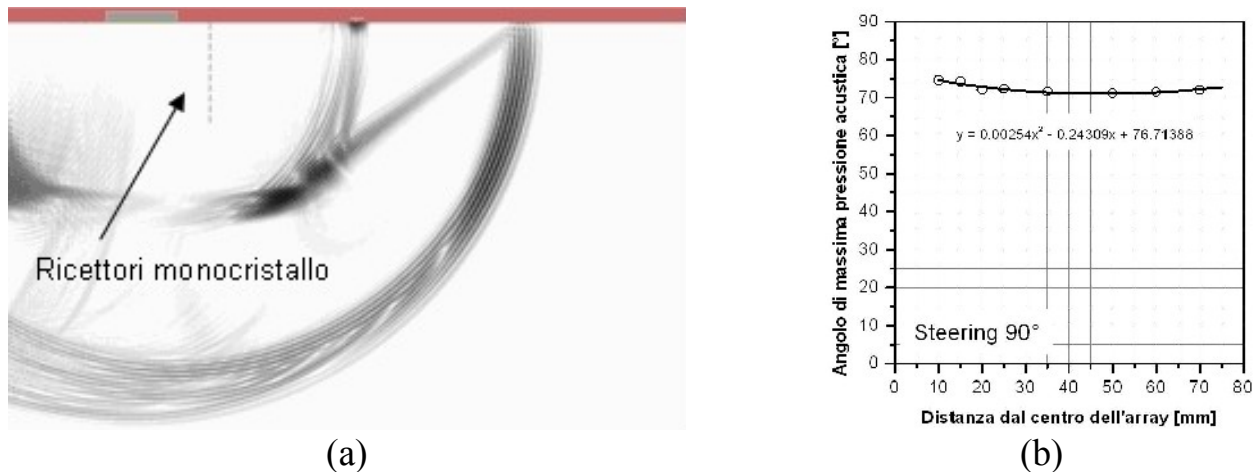


Figura 4 – Analisi del massimo valore di pressione acustica per un array di sorgenti: a) sistema analizzato; b) angolo di massima pressione per steering 90°.

#### 4. Simulazioni dedicate al dimensionamento dei difetti

Ci si è quindi dedicati ad analizzare l'applicazione di sorgenti array pulse-echo sotto il primo angolo critico al dimensionamento di difetti affioranti (le sonde monocristallo sono ormai consolidate nella pratica ed esistono diverse tecniche); in questa campagna di simulazioni sono state considerate sia situazioni “Inner Diameter” (ID) dove dato uno spessore il difetto affiora sul lato opposto rispetto a quello di misura, sia “Outer Diameter” (OD) dove il difetto affiora sullo stesso lato della misura.

##### 4.1. Simulazioni per il dimensionamento OD

La sorgente array è stata configurata allo stesso modo descritto in §3.2. Sono state analizzate diverse configurazioni di profondità di difetto e diverse distanze sorgente-difetto presenti in un blocchetto di acciaio al carbonio di dimensioni 20x60 mm.

Fig. 5 mostra l'esempio di sorgente con steering pari a 90° e con difetto distante 5 mm dal centro dell'array e profondo 5 mm. L'eco ottenuta è quella di maggiore ampiezza tra tutte le analisi effettuate in posizione OD.

Come si può osservare, il risultato

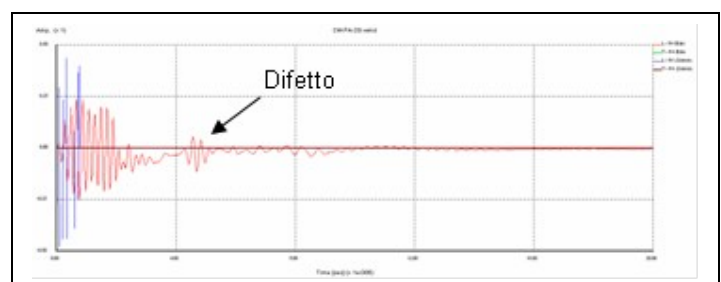


Figura 5 – Risposta di un difetto OD.

ottenuto mediante la tecnica pulse-echo non è molto significativo in quanto non è stato ottenuto un rapporto segnale rumore sufficientemente elevato. Ciò sembrerebbe suggerire

che la tecnica con array di sonde in modalità pulse-echo non sia la più adatta a misure di difetti in posizione OD e che ci si debba rivolgere verso altre metodologie.

#### 4.2. Simulazioni per il dimensionamento ID con angoli di incidenza molto inferiori al primo critico

Anche in questo caso, la sorgente array è stata impostata come descritto in §3.2 però con angolo di steering pari a  $30^\circ$  (il fronte geometrico trasversale si allinea su una direzione di circa  $19^\circ$ ). Il blocchetto di acciaio al carbonio considerato ha dimensioni  $20 \times 60$  mm e la distanza tra l'array e i riflettori è stata impostata in modo da avere l'incidenza allo spigolo di affioramento. Le simulazioni svolte hanno considerato innanzitutto il caso di riferimento del grande riflettore (Fig. 6a) e successivamente difetti di varia profondità (si mostrano gli esempi di profondità 15, 10, 5, 3 e 1 mm rispettivamente nelle Fig. 6b fino a 6f).

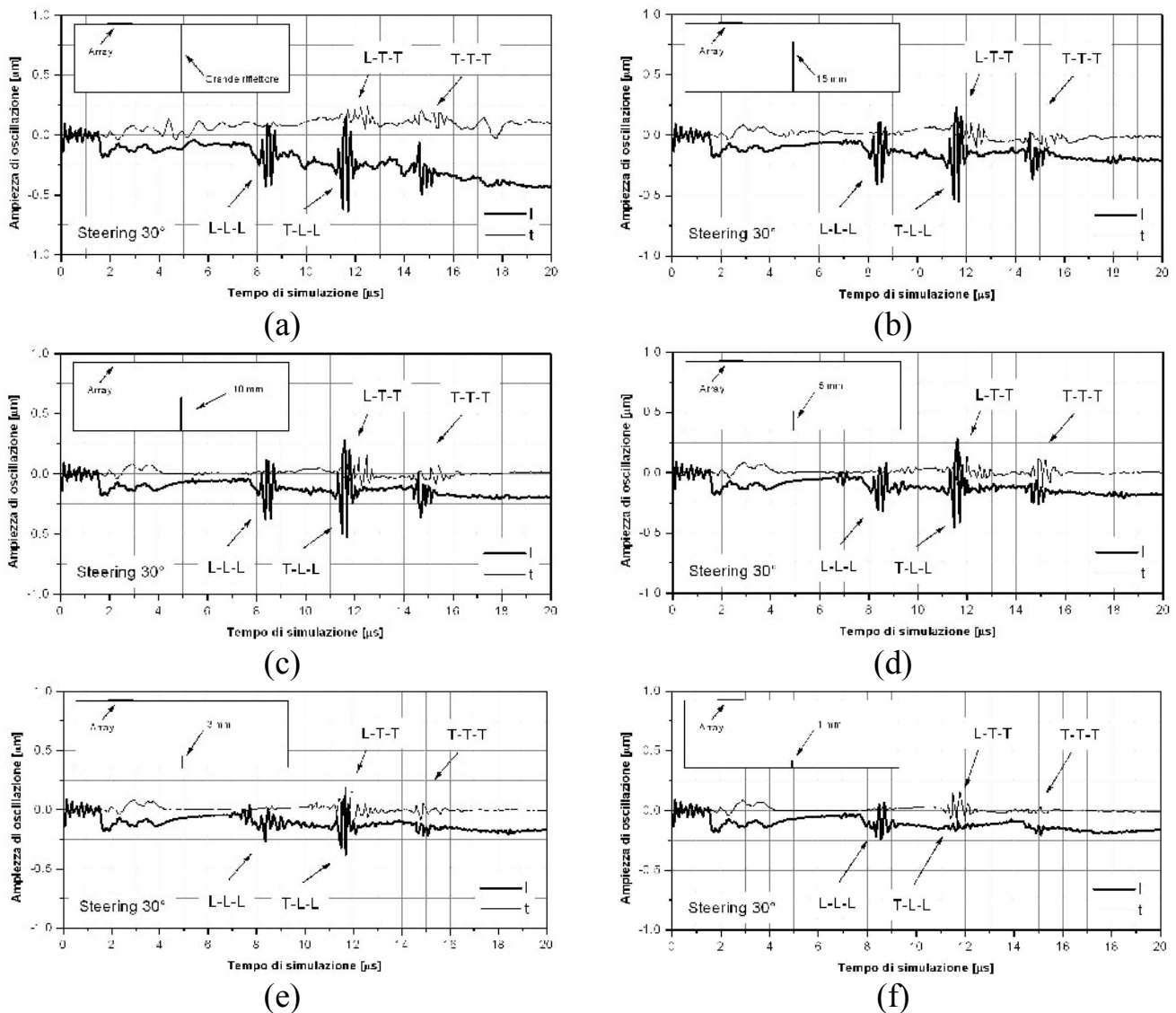


Figura 6 – Variazione degli ecogrammi al variare della dimensione del difetto ID con steering pari a  $30^\circ$ .

Comparando gli ecogrammi ricevuti nelle varie condizioni di estensione del difetto si può innanzitutto concludere che, per la geometria scelta, l'influenza del difetto rispetto al grande riflettore si può apprezzare solo per profondità uguale o inferiore a 5 mm. Inoltre, le indicazioni che maggiormente possono dar luogo a un giudizio sulla sua estensione



riguardano i picchi nella posizione intermedia, interpretabili come ricezione di componenti L-T-T e T-L-L dalla parete del difetto e dal bordo della lamiera: in particolare si può osservare da Fig. 7 che le due componenti hanno uguale il tempo di volo, ma diverse la polarizzazione prevalente in ricezione e la focalizzazione in corrispondenza dello spigolo. E' necessario, a questo punto, rimarcare che: le diciture L e T si riferiscono al comportamento longitudinale e trasversale dell'onda elastica rispetto alla direzione di propagazione del fascio. Le diciture l e t, invece, che contraddistinguono i due ecogrammi delle Fig. 6a-6f, si riferiscono alle direzioni di propagazione in ricezione rispetto alla giacitura del cristallo.

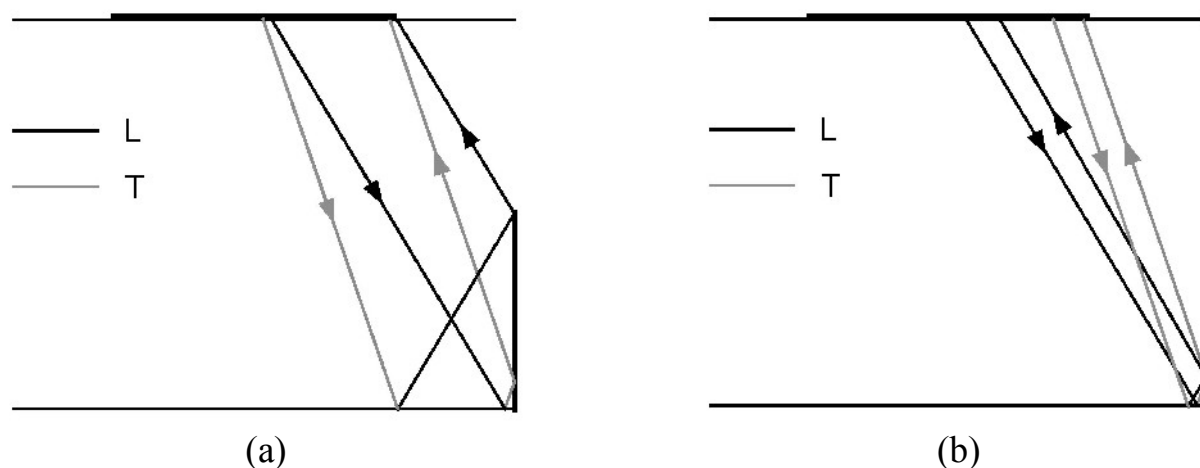


Figura 7 – Tempi di volo e percorsi delle componenti T-L-L e L-T-T per due profondità differenti di difetto.

Passando dal difetto più esteso via via a quello meno esteso si osservano quindi i seguenti comportamenti:

- la componente  $(L-T-T)_t$  (polarizzata in senso trasversale in ricezione) non risente della maggiore o minore estensione del difetto;
- la componente  $(T-L-L)_l$  (polarizzata in senso longitudinale in ricezione) si riduce progressivamente in ampiezza al diminuire della estensione del difetto;
- la componente  $(T-L-L)_t$  (polarizzata in senso trasversale in ricezione) si presenta sdoppiata in due picchi separati soprattutto per il difetto più esteso a causa del ritardo di emissione dall'array lungo i percorsi T-L-L e L-L-T; al diminuire della estensione del difetto i due picchi prima si avvicinano poi la loro posizione relativa sull'ecogramma si inverte.

#### 4.3. Simulazioni per il dimensionamento ID con angoli di incidenza vicini al primo critico

L'approccio mostrato nel paragrafo precedente è stato applicato anche nel caso di steering pari a  $90^\circ$  (il fronte geometrico trasversale si allinea su una direzione di circa  $33^\circ$ ). Il blocchetto di acciaio al carbonio considerato ha dimensioni  $20 \times 100$  mm e la distanza tra l'array e i riflettori è stata impostata pari a 58 mm in modo da avere angolo di massima pressione pari a  $71^\circ$ , come mostrato in Fig. 4b, incidente nello spigolo di affioramento. Le simulazioni svolte hanno considerato innanzitutto il caso di riferimento del grande riflettore (Fig. 8a) e successivamente difetti di varia profondità (si mostrano gli esempi di profondità 15, 10 e 5 mm rispettivamente nelle Fig. 8b fino a 8d). In questo caso, non è stato però possibile risalire alla successione delle tipologie di onda tra una riflessione e la



successiva fino all'eco di risposta. Ciò perché, data l'impostazione delle simulazioni, il numero di riflessioni, dalle pareti e dal difetto ed in grado di restituire un'eco in ricezione, varia (Fig. 8) tra tre per il caso di risposta più veloce sino a sei per il caso di risposta più lenta con un elevato numero possibile di combinazioni. Osservando Fig. 8a si può infatti notare come vengano ricevute quattro eco notevoli tra le due componenti limite.

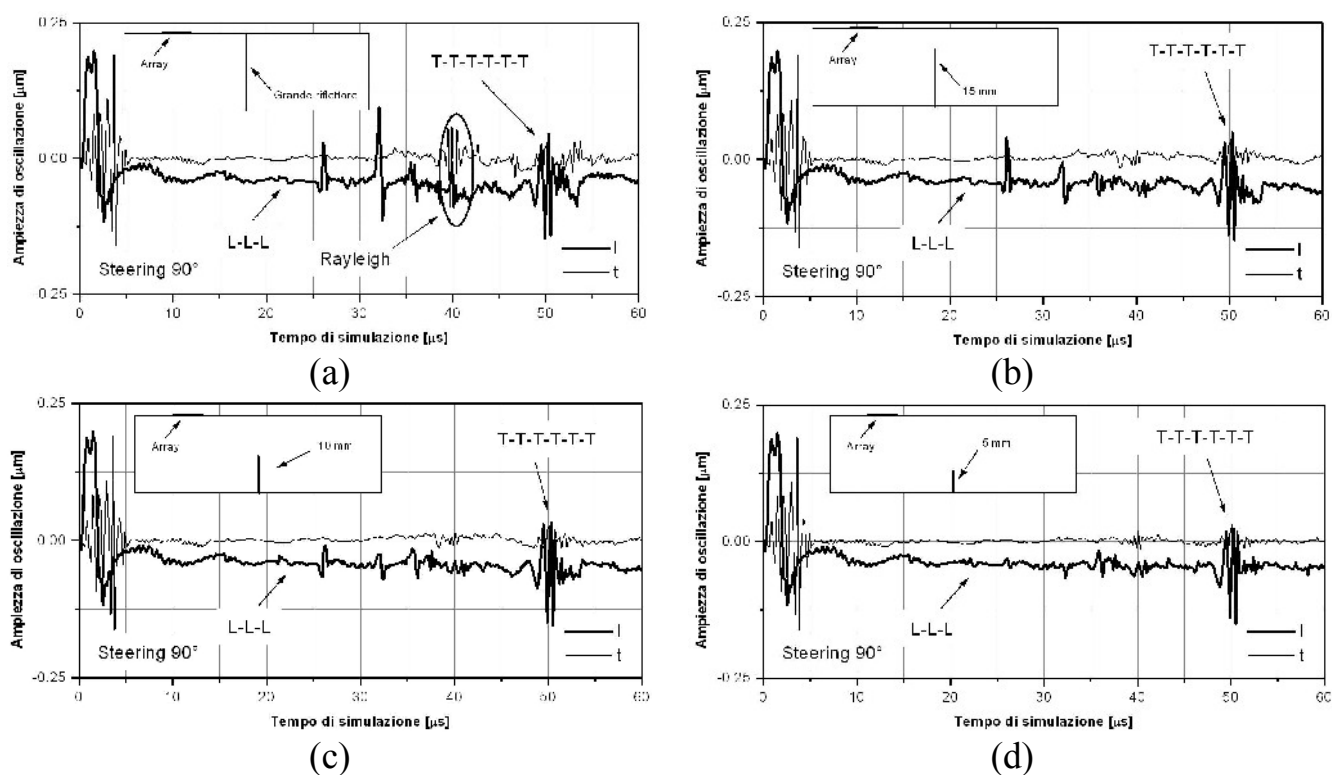


Figura 8 – Variazione degli ecogrammi al variare della dimensione del difetto ID con steering pari a 90°.

Commentando come nel caso precedente, si osservano quindi i seguenti comportamenti:

- l'ampiezza delle eco di risposta sono significativamente inferiori a quelle osservate nel caso di steering pari a 30°, suggerendo una minore sensibilità delle CW;
- nel caso di grande riflettore è possibile osservare l'eco dell'onda di Rayleigh (Fig. 8a) che va a sparire, come atteso, con il difetto non più affiorante in posizione OD;
- le componenti  $(L-L-L)_l$  e  $(T-T-T-T-T-T)_{l+t}$  non si modificano, suggerendo il fatto che esse si riflettano in corrispondenza o molto vicino allo spigolo di affioramento;
- le risposte intermedie variano in ampiezza con la dimensione del difetto diventando indistinguibili dal rumore per difetti di profondità uguale o minore a 5 mm.

## 5. Conclusioni

Nella presente memoria è stato approfondito, dal punto di vista applicativo, l'annoso problema del dimensionamento dei difetti. In particolare, ci si è occupati di ricostruire le modalità di propagazione per sorgenti inclinate sotto il primo angolo critico, quelle che per gli angoli prossimi a 90° emettono anche le cosiddette "Creeping Waves". L'argomento è stato affrontato utilizzando diverse tipologie di sorgente (array o monosonda inclinata) e osservando le capacità operative nel caso di difetti affioranti in posizione "Inner Diameter" o "Outer Diameter".

Il software utilizzato per le simulazioni (Wave2000 Pro) si è rivelato uno strumento efficace, in grado di fornire risultati ragionevoli dal punto di vista fenomenologico.

Le simulazioni effettuate hanno mostrato il consistente vantaggio legato all'impiego di array di sonde rispetto alla sorgente monosonda, ma anche il peculiare comportamento nel mostrare una variazione, con la distanza dalla sorgente, dell'angolo di massima pressione sonora.

Per il dimensionamento dei difetti, è stato osservato che le CW, sia nel caso OD, sia ID, necessitano, per fornire un quadro utile e completo, di essere affiancate da altre tecniche. Incoraggianti risultati, da verificare ulteriormente mediante approcci sperimentali, sono invece stati ottenuti nel caso ID con angoli molto inferiori al primo critico.

## 6. Bibliografia

1. AIM-PnD – “Le prove non distruttive presentate dall'AIM”. Centro di studio per le prove non distruttive, 1973.
2. J. M. Davis – “Chapter One: Basic Wave Physics For Sizing Methods”, NDT.net 1998, Vol.3 No 11.
3. S. Song et al. – “Angle Beam Ultrasonic Testing Models and Their Application to Identification and Sizing of Cracks”, Atti del “NDE2002: Predict, Assure, Improve”, National Seminar of ISNT Chennai, 2002.
4. R. Minkwitz – “Detection and Sizing Techniques of ID Connected Cracking”, GE Panametrics NDT Division.
5. K. J. Langenberg et al. – “On the Nature of the So-called Subsurface Longitudinal Wave and/or Surface Longitudinal Creeping Wave”, University of Kassel, Department of Electrical and Computer Engineering, Electromagnetic Field Theory.
6. D. Bouche et al. – “Creeping and generalized creeping waves”. University of St. Petersburg, Russia, 2000.
7. P. Hayward – “Detection and Sizing of Cracking from the Inner Surface using ID Creeping Waves”, Atti del NZNDTA National Conference, Palmerston North, 2004.
8. R. Marklein et al. – “EFIT Simulation for Ultrasonic NDE”, University of Kassel, Department of Electrical and Computer Engineering, Electromagnetic Field Theory.
9. Wave2000 Pro versione 2.2 – Cyberlogic Inc., New York, USA. Sito Web: <http://www.cyberlogic.org/index.html>.
10. CIVA 8.1 – CEA Consortium, France. Sito Web: <http://www-civa.cea.fr>.
11. P. Ramondetta et al. – “Simulazioni di indagini ultrasonore finalizzate al crack sizing”, Tesi di Laurea, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, 2006.
12. R/D Tech inc. Introduction to phased array ultrasonic technology applications. R/D Tech Guidelines, 2004.
13. Gianni Gebbia – “Ultrasonic Phased Array: una moderna tecnologia per il crack sizing”, Tesi di Laurea, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, 2005.