

**Tesi di Dottorato di Ricerca  
in "Controlli Non Distruttivi"**

**Ciclo V°**

**Titolo:**

**Tecniche avanzate per la classificazione  
e misura dei difetti ad ultrasuoni**

**Dott.Ing. Lorenzo Capineri**

**Firenze, Febbraio 1993.**

# Indice

Introduzione .....	1
Capitolo 1	
Classificazione automatica in tempo reale dei difetti in saldature a V in acciaio con immagini tridimensionali ad ultrasuoni.	
1.1 Introduzione ai metodi di classificazione: metodi convenzionali e reti neurali .....	4
1.2 Acquisizione e pre-elaborazione dei dati ultrasonici .....	8
1.3 Sistema per la classificazione automatica dei difetti in tempo reale. ....	14
1.3.1 Il sistema di acquisizione dati ZIPSCAN e HFD-2 sviluppato dal NNDTC della Harwell Laboratory .....	16
1.3.2 Modulo di programma di pre-elaborazione .....	18
1.3.3 Modulo di programma per la classificazione .....	22
1.4 Risultati preliminari su campioni con difetti reali .....	26
1.5 Sistema di presentazione dati assistito dal calcolatore come supporto alla classificazione ....	31
1.6 Selezione automatica dei parametri del preprocessore e del classificatore .....	35
1.7 Conclusioni e sviluppi futuri .....	36
Bibliografia .....	37
Capitolo 2	
Tecniche avanzate di imaging ad ultrasuoni: tomografia per diffrazione a banda larga come metodo diretto per misure accurate dei difetti.	
2.1 Introduzione sulle tecniche di immagini ad ultrasuoni ed organizzazione del lavoro svolto. ..	39
2.2 Principi della tomografia per diffrazione con segnali a banda larga: sviluppo teorico della risoluzione laterale del sistema ad apertura sintetica con il metodo delle sorgenti elementari .....	43
2.3 Effetti della discretizzazione del campionamento spaziale. ....	47
2.4 Aspetti teorico-sperimentali delle sorgenti e ricevitori con dimensione finita. ....	50
Bibliografia .....	53
Capitolo 3	
Analisi dei modelli teorici per controlli non distruttivi con segnali a banda larga: sviluppo di un modello semplice per foro laterale di calibrazione con l'approssimazione di piccole lunghezze d'onda.	
3.1 L'impiego dei modelli teorici per la valutazione della risposta dei sistemi di ispezione ad ultrasuoni .....	56

3.2	Generalità sull'accuratezza e la complessità dei modelli teorici . . . . .	57
3.2.1	Modelli analitici . . . . .	58
3.2.2	La teoria geometrica della diffrazione . . . . .	58
3.2.3	L'approssimazione di Kirchhoff . . . . .	59
3.2.4	L'approssimazione di Born . . . . .	60
3.3	Simulazioni al calcolatore dei segnali diffratti da difetti volumetrici e loro implicazioni per i metodi di indagine con segnali a banda larga . . . . .	61
3.3.1	Confronto fra i limiti di validità dell'approssimazione di Born per applicazioni ai sistemi di immagine in medicina e nei controlli non distruttivi. . . . .	62
3.3.2	Simulazioni al calcolatore dei segnali diffratti da inclusioni sferiche con approssimazione di Born basata sull'equazione Eikonale: il caso di inclusioni di solfato di manganese in acciaio e delle inclusioni di silicio in carburo di silicio . . . . .	64
3.4	Modulo di simulazione della risposta ultrasonica di un foro laterale per la calibrazione di sistemi di ispezione con tecnica TOFD (Time Of Flight Diffraction). . . . .	70
3.4.1	Osservazioni sperimentali e scelta del tipo di approssimazione per il modello. . . . .	70
3.4.2	Sviluppo di un modello semplice per foro laterale basato sull'approssimazione dell'ottica geometrica . . . . .	72
3.4.3	Modulo di programma per la simulazione per sistema di ispezione con tecnica TOFD: confronto delle simulazioni con risultati sperimentali. . . . .	76
	Bibliografia . . . . .	80

#### Capitolo 4

Teoria e progetto di filtri inversi per migliorare la stima dei difetti tramite tomografia ad ultrasuoni.

4.1	Tecniche di filtraggio dei segnali e delle immagini per controlli non distruttivi ad ultrasuoni . . . . .	82
4.2	Filtri inversi per immagini ricostruite con tecniche ad apertura sintetica . . . . .	85
4.3	Filtraggio di Wiener sulle immagini a radiofrequenza . . . . .	86
4.4	Progetto di un filtro di compensazione d'ampiezza su immagini rivelate con involuppo . . . . .	92
	Bibliografia . . . . .	99

#### Capitolo 5

Progetto di un prototipo di sistema di mascheratura di sonde ad ultrasuoni per la realizzazione di sorgenti isotrope efficienti con sonde ad immersione

5.1	Vantaggi offerti dalle sorgenti puntiformi per i sistemi di imaging ad ultrasuoni . . . . .	100
5.2	Progetto al calcolatore del sistema di mascheratura per l'ottimizzazione delle prestazioni . . . . .	102
5.3	Progetto del sistema di mascheratura e misure sul prototipo realizzato . . . . .	107
	Bibliografia . . . . .	111



## Capitolo 6

Sistema sperimentale ad apertura sintetica multi-offset per immagini ad ultrasuoni con alta risoluzione in tempo-reale.

6.1	Sistema meccanico di scansione e di acquisizione dati .....	112
6.2	Implementazione dell'algoritmo di ricostruzione dell'immagine tomografica e considerazioni sui tempi di calcolo .....	116
6.2.1	Osservazioni sull'applicazione delle tecniche di ottimizzazione .....	116
6.2.2	Progetto di un'architettura di calcolo per l'elaborazione in tempo reale: parallelizzazione dell'algoritmo con tabella dei ritardi .....	119
6.2.3	Risultati dei tempi di elaborazione: confronto tra diversi algoritmi e calcolatori ...	122
6.2.4	Tempo di calcolo e tecniche di compressione del segnale. Confronti con il sistema ALOK, trasformata di Hough e di Oja .....	123
6.3	Risultati. Confronto tra le immagini sperimentali e simulate con difetto campione in blocco di acciaio ferritico .....	125
	Bibliografia .....	135
	Ringraziamenti .....	136

## Appendice A

	Applicazione della tomografia per diffrazione per la rivelazione di difetti in materiali ceramici: esempio del Si-SiC. ....	137
	Bibliografia .....	140



## Introduzione

La classificazione dei difetti, ovvero la loro appartenenza a classi di difetti prestabilite, e la loro misura in senso generale (posizione, estensione, orientazione e forma) sono alcuni dei problemi fondamentali dei controlli non distruttivi ad ultrasuoni.

In questa tesi di dottorato sono stati sviluppati dei sistemi per la classificazione e la misura dei difetti tramite le immagini ottenute con gli ultrasuoni adottando nuove tecniche come l'intelligenza artificiale ed il progetto assistito dal calcolatore (CAD). Come si vedrà nel seguito della Tesi, il lavoro di ricerca e' stato affrontato su tre importanti aspetti dei controlli non distruttivi: progetto di sistemi sperimentali, elaborazione dell'immagini (oggi quest'ultime rivestono un ruolo sempre più importante data la loro maggiore quantità d'informazione) e lo studio di modelli teorici. Personalmente credo che in futuro la ricerca di nuove tecniche per i controlli non distruttivi con ultrasuoni debba rivolgersi contemporaneamente all'insieme di questi tre aspetti.

Il problema della classificazione e' stato affrontato con la realizzazione di un sistema completo di acquisizione ed elaborazione in tempo reale di immagini tridimensionali ad ultrasuoni, che fornisce in modo autonomo il tipo di difetto fra alcune classi predefinite. Per la classificazione si sono impiegati dei classificatori convenzionali e con reti neurali entrambi adattati al problema specifico del controllo dei difetti nelle saldature in acciaio. In particolare sono considerati quattro tipi di difetti: porosità, inclusioni, cricche frastagliate e cricche piane.

L'appartenenza di un difetto ad una certa classe e' importante in quanto ai diversi tipi di difetto corrispondono diverse probabilità di rottura del pezzo in servizio. Il progetto di un sistema capace di classificare le immagini ultrasonore in modo autonomo rende possibile il controllo non distruttivo di oggetti estesi o equivalentemente un numero elevato di oggetti. A causa della durata di questa procedura, l'operatore umano pur essendo esperto ed intelligente, può sbagliare a causa dell'affaticamento o per una interpretazione troppo soggettiva. L'uso dell'intelligenza artificiale, come le reti neurali,

potrebbe rivelarsi una efficace soluzione a questo problema.

L'altro obiettivo della tesi e' la misura dei difetti, che assume una particolare importanza sia nel campo della ricerca che nel campo delle applicazioni industriali; per queste ultime esistono già delle tecniche ad ultrasuoni standardizzate, le cui prestazioni sono definite tramite misure su difetti campione o di calibrazione.

Le tecniche avanzate di ispezione cercano di migliorare l'accuratezza della misura dei difetti: la maggior parte di esse si basano su sistemi multi-sonda adattati in diverso modo alla specifica applicazione (differenti geometrie del pezzo da investigare). Queste tecniche appartengono ai cosiddetti sistemi ad apertura sintetica, che sono impiegati anche in altri campi come la sismica, i radar e con alcune potenzialità anche in medicina.

In questo lavoro viene proposta una tecnica generale ad apertura sintetica per la ricostruzione di immagini ad ultrasuoni con alta risoluzione. La teoria alla base di questa tecnica e' stata sviluppata e poi verificata sia con simulazioni al calcolatore sia con un sistema sperimentale appositamente progettato. I vantaggi offerti da questa tecnica per l'indagine di difetti di forma relativamente complessa, sono evidenti con l'impiego di sorgenti e ricevitori puntiformi. Il progetto al calcolatore e la realizzazione di un nuovo sistema efficiente di mascheratura per sonde ad ultrasuoni e' riportato in questa tesi.

L'eccellente accordo tra i risultati simulati e quelli sperimentali per difetti artificialmente prodotti in acciai, ha suggerito lo sviluppo di un simulatore che possa essere usato per stimare la risposta ultrasonica da alcuni difetti. Un sistema integrato di programmi di simulazione e' stato progettato per rappresentare la maggior parte delle situazioni sperimentali incontrate nei controlli non distruttivi ad ultrasuoni (indagine con sonde a contatto o ad immersione, superfici emittenti planari, sistemi multi-sonda o a coppia).

Le tecniche ad apertura sintetica presentano alcuni vantaggi per i controlli non distruttivi:

- Misura dei difetti più accurata
- Possibilità d'indagine di difetti con forma relativamente complessa
- L'immagine ricostruita fornisce generalmente una buona rappresentazione del difetto



Infine un altro tema affrontato in questa tesi, legato al problema della simulazione dei difetti, è il confronto tra vari modelli teorici analitici del campo diffratto dai difetti. Per il campo di frequenze adottato nella fase sperimentale e riferendosi in particolare all'indagine di acciai, si sono considerati i modelli basati sull'approssimazione di Born e la Teoria Geometrica della Diffrazione. Infatti l'adeguatezza e la capacità dei sistemi di indagine ad ultrasuoni può essere valutata al computer tramite la sintesi del campo diffratto dai difetti (generalmente assunti con geometrie semplici) mediante modelli teorici approssimati che si differenziano essenzialmente in base al rapporto tra la lunghezza d'onda e le dimensioni caratteristiche del difetto. Dalle osservazioni sperimentali e dalle simulazioni si sono valutate quantitativamente le onde ultrasonore riflesse e diffratte da difetti campione. In questo lavoro è stato proposto un modello teorico di un difetto di forma cilindrica, tipo un foro laterale in un blocco di calibrazione. Il modello sviluppato è basato sulle osservazioni sperimentali dei segnali retrodiffusi.

Durante la fase di realizzazione di questi sistemi sono stati considerati anche gli aspetti realizzativi e tecnologici sia del classificatore automatico che della tecnica di misura dei difetti, per la loro applicabilità in campo industriale, essendo questi principalmente dedicati alla verifica dell'integrità strutturale dei pezzi in servizio.



## Capitolo 1

# Classificazione in tempo reale dei difetti in saldature a V in acciaio con immagini tridimensionali ad ultrasuoni.

### 1.1 Introduzione ai metodi di classificazione: metodi convenzionali e reti neurali

Le tecniche di misura ad ultrasuoni sono state largamente utilizzate nel campo dei controlli non distruttivi per la misura e la classificazione dei difetti nei materiali metallici. Il problema della misura dell'estensione del difetto è stato risolto nell'ambito della teoria della propagazione degli ultrasuoni che mette in relazione le informazioni contenute nel segnale ultrasonico misurato con le proprietà di scattering del difetto inserito nel materiale metallico [1.1]. Questo è stato possibile grazie ad un grande quantità di ricerche sulla teoria della propagazione degli ultrasuoni durante l'ultimo ventennio, ed oggi sono disponibili tecniche di indagine affidabili [1.2]-[1.3].

Per quanto riguarda la classificazione dei difetti da immagini ad ultrasuoni o eventualmente dai segnali monodimensionali, è importante l'esperienza acquisita sul campo e valutazioni affidabili sono ancora oggi demandate solo al personale specializzato.

Recentemente il problema della classificazione dei difetti è stato affrontato da un numero crescente di gruppi di ricerca a livello mondiale (USA, Gran Bretagna, Giappone), ed alcuni lavori fondamentali furono sviluppati da Burch et al. [1.4] e Windsor et al. [1.5], Windsor [1.6]. Nel lavoro originale di Burch furono definite quattro classi di difetti e la classificazione di un insieme di difetti artificialmente prodotti in campioni metallici, fu fatta mediante sistemi convenzionali di riconoscimento di forme (da qui in poi verrà usato il termine inglese "pattern recognition") basati sull'estrazione di caratteristiche (o dall'inglese "features") dalle immagini ad ultrasuoni. I quattro tipi di difetti considerati significativi per i controlli non distruttivi delle saldature sono:

- 1) "Porosity": porosità dovute alle soffiature della saldatura
- 2) "Slag": inclusioni di altri materiali
- 3) "Smooth crack": cricche piane dovute a mancanza di fusione
- 4) "Rough crack": cricche dovute allo sforzo a fatica del materiale

La scelta di queste classi è basata sul fattore di rischio associato ad ogni tipo di difetto: per esempio le cricche sono state suddivise in due classi e sono generalmente più pericolose per l'integrità della struttura che i difetti volumetrici tipo porosità o agglomerati di inomogeneità tipo inclusioni.

Sempre nel lavoro di Burch fu subito chiaro che la scelta delle caratteristiche tipiche di ogni difetto non era facile [1.4] e la scelta finale fu basata in gran parte sui suggerimenti da parte di tecnici esperti. In questo primo approccio al problema furono utilizzati dei classificatori convenzionali e furono ottenuti risultati molto interessanti, ma la discriminazione fra le classi non era sufficiente per avere delle risposte affidabili. Più tardi si cercò di migliorare le prestazioni della classificazione basata sull'estrazione di caratteristiche indagando nuovi metodi basati sulle reti neurali.

Recentemente le reti neurali hanno allargato il campo di applicazione avendo dimostrato la loro utilità in settori specifici dei sistemi di controllo automatico. Attualmente sono impiegate nel campo dell'elaborazione della voce [1.7]-[1.8] e nella sismica per l'inversione dei dati [1.9]. Una caratteristica comune a tutte queste applicazioni è "l'esperienza" che deve apprendere il sistema. Il successo delle reti neurali è dovuto all'abilità generalizzare le loro prestazioni anche con situazioni presentate in ingresso abbastanza diverse da quelle utilizzate nella fase di apprendimento. Un altro fattore importante è il basso tempo di elaborazione rispetto ai metodi convenzionali, che può essere ulteriormente diminuito grazie alla loro struttura che si presta per sistemi di elaborazione parallela.

Tornando al nostro problema, le prestazioni dei metodi di classificazione con reti neurali furono confrontate con quelle ottenute nel precedente lavoro di Burch [1.4] sulla stessa campionatura di difetti. Il risultato fu che la classificazione basata sull'estrazione delle caratteristiche tramite le reti neurali era comparabile con quella convenzionale. In particolare fu trovato che il metodo di apprendimento con la back-propagation con una rete a due livelli completamente connessa [1.10], funzionava meglio che una rete neurale di Hopfield. Nonostante che il metodo di apprendimento non iterativo delle reti di Hopfield sia veloce, questo metodo ha lo svantaggio che a punti vicini nello spazio delle caratteristiche non corrispondono necessariamente ad immagini con molti pixel in comune, lasciando poco margine per l'interpretazione dei risultati.

Perciò la conclusione dell'indagine sulla classificazione tramite l'estrazione delle



caratteristiche è che esistono diversi classificatori sia tra i metodi convenzionali e sia tra quelli con reti neurali con buone prestazioni. Classificazioni con elevato fattore di successo (indicativamente >90%) sono possibili quando i classificatori sono formati partendo da un insieme caratteristiche significative ed insiemi consistenti di dati per l'apprendimento.

Il punto dal quale è partito questo lavoro si basa essenzialmente su due osservazioni a riguardo dei risultati raggiunti con metodi nello spazio delle caratteristiche e rilevanti per la nostra specifica applicazione:

- 1) *Il tempo di calcolo per estrarre le caratteristiche e' troppo alto: i benefici offerti da un metodo di classificazione veloce, come le reti neurali, sono vanificati perche' il calcolo per estrarre i valori delle caratteristiche richiede l'impiego una notevole potenza di calcolo per avere risposte in tempo reale,*
- 2) *E' sempre richiesto un giudizio soggettivo per definire l'insieme di caratteristiche piu' adatto da estrarre dalle immagini ad ultrasuoni.*

I recenti sviluppi nelle reti neurali artificiali (Artificial Neural Networks) possono rappresentare una soluzione alternativa a questo problema e quindi un interessante obiettivo per un'attività di ricerca. Sebbene questi metodi rivendicano molti successi in diverse applicazioni in campo scientifico e tecnologico, di fatto non esistono soluzioni eleganti per il progetto della struttura della rete che assicuri il successo in una applicazione specifica. Quindi per questo lavoro ci siamo limitati a considerare i metodi di apprendimento con supervisione ovvero con l'imposizione degli obiettivi dall'esterno, piuttosto che lasciare alla rete il modo di formare autonomamente degli agglomerati di dati (o "clusters") per le diverse classi.

Queste osservazioni hanno stimolato uno studio della realizzazione di sistemi di classificazione automatica di difetti nelle saldature attraverso le immagini ultrasoniche. Il lavoro descritto in questo capitolo riguarda il progetto e la sperimentazione di un prototipo per l'acquisizione e la classificazione automatica dei difetti nelle saldature svolto in collaborazione con il National Non-Destructive-Centre della Harwell Laboratory (UK).



In particolare è stata considerata la classificazione dei difetti direttamente dai dati ultrasonici acquisiti, che ha il vantaggio di essere più veloce che la classificazione nello spazio delle caratteristiche in quanto non è necessaria l'operazione preliminare dell'estrazione delle caratteristiche. Anche in questa nuova fase del progetto, sono confrontati i metodi di classificazione convenzionali e quelli con reti neurali. In questo caso è stato necessario adattare questi metodi al nostro problema in modo tale che potessero svolgere unitamente sia l'estrazione delle caratteristiche che la classificazione.

Parte di questo lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto europeo ANNIE (Applications of Neural Networks for Industry in Europe), che aveva come obiettivo l'applicazione delle reti neurali per pattern recognition in applicazioni industriali ad alto contenuto tecnologico. Nella fase preliminare del progetto ANNIE furono analizzati diversi metodi basati sulle reti neurali [1.10]-[1.12], i cui risultati hanno indicato quale fossero i migliori metodi da implementare in un prototipo dimostrativo, che poi è stato l'oggetto di questa attività di ricerca.

Esistono molti metodi di classificazione basati sulle reti neurali che operano l'apprendimento in modo supervisionato di clusters in uno spazio di caratteristiche n-dimensionale adattabili al nostro problema, come osservato da Grossberg [1.13], e dal progetto ANNIE stesso [1.14]. Recentemente le reti neurali di tipo probabilistico sono state applicate con un certo successo per la classificazione dei difetti nelle saldature mediante l'analisi delle caratteristiche delle tracce ultrasoniche monodimensionali come riportato da Song et al. [1.15].

In questo lavoro sono invece riportati i risultati preliminari relativi a due metodi di classificazione automatica, che operano direttamente su immagini tridimensionali ad ultrasuoni. Un prototipo di laboratorio è stato messo a punto per l'acquisizione dei dati e la valutazione delle prestazioni raggiungibili con la classificazione anche in termini di velocità. Infatti sono questi i due fattori chiave, affidabilità della classificazione e velocità della risposta, per prevedere l'applicazione a livello industriale di questi metodi. I classificatori utilizzati in questo lavoro, sono stati creati sulla banca dati di difetti campione creata da Burch et al. [1.4]. Il nuovo sistema è invece servito per acquisire nuovi insiemi di dati provenienti da difetti reali su saldature a V.

Si sono poi verificate le prestazioni della classificazione su questa geometria che non era

inclusa nei difetti della banca dati originale ed è più vicina alle situazioni reali di esercizio.

Parte del lavoro è stata dedicata allo studio e la messa a punto di un modulo preprocessore che elabora in tempo reale i dati acquisiti per renderli compatibili in un formato standard con i classificatori costruiti sulla base della banca dati originale.

Come vedremo nei successivi paragrafi, il modulo preprocessore ha una grande importanza per una classificazione affidabile in quanto deve ridurre ad un formato standard intellegibile dal classificatore, i dati provenienti da situazioni sperimentali anche molto diverse tra loro, senza tuttavia perdere nessuna informazione utile alla classificazione.

## **1.2 Acquisizione e pre-elaborazione dei dati ultrasonici**

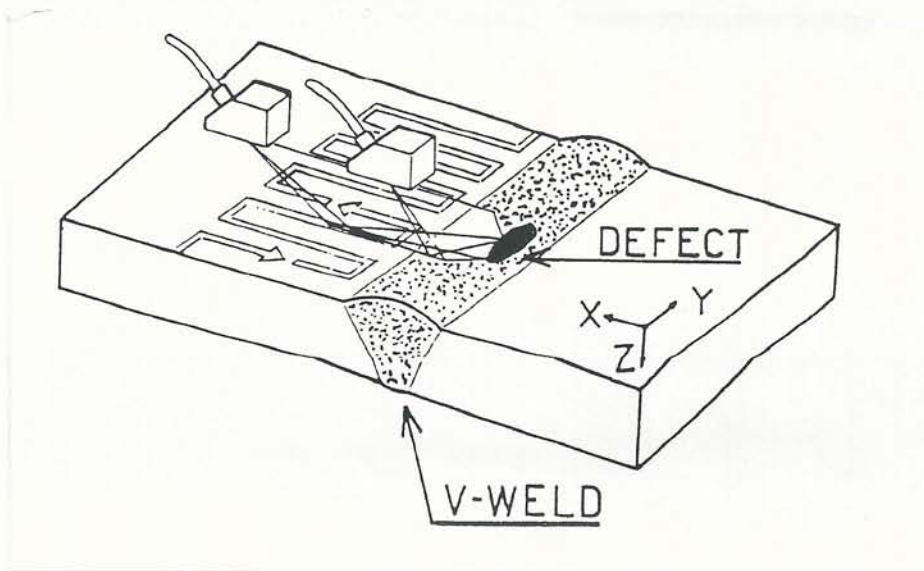
In questo paragrafo saranno descritte le caratteristiche e le specifiche dei primi due blocchi del sistema quello di acquisizione e pre-elaborazione dei segnali. In uscita si ottiene una immagine in formato standard pronta per essere classificata dal modulo classificatore.

Le misure dei segnali riflessi da vari tipi di difetti, hanno messo in evidenza che per avere utili informazioni sul tipo di difetto era necessario eseguire una analisi dei segnali riflessi dall'intero volume del difetto, come anche l'indagine secondo diversi angoli di incidenza. Questo significa che è necessario usare per la classificazione immagini tridimensionali (3D) o quadridimensionali (4D), dove le prime due dimensioni X,Y sono quelle relative al piano di scansione sulla superficie della saldatura, la terza dimensione Z è la profondità e la eventuale quarta dimensione è l'angolo di incidenza del fascio ultrasonico della sonda utilizzata.

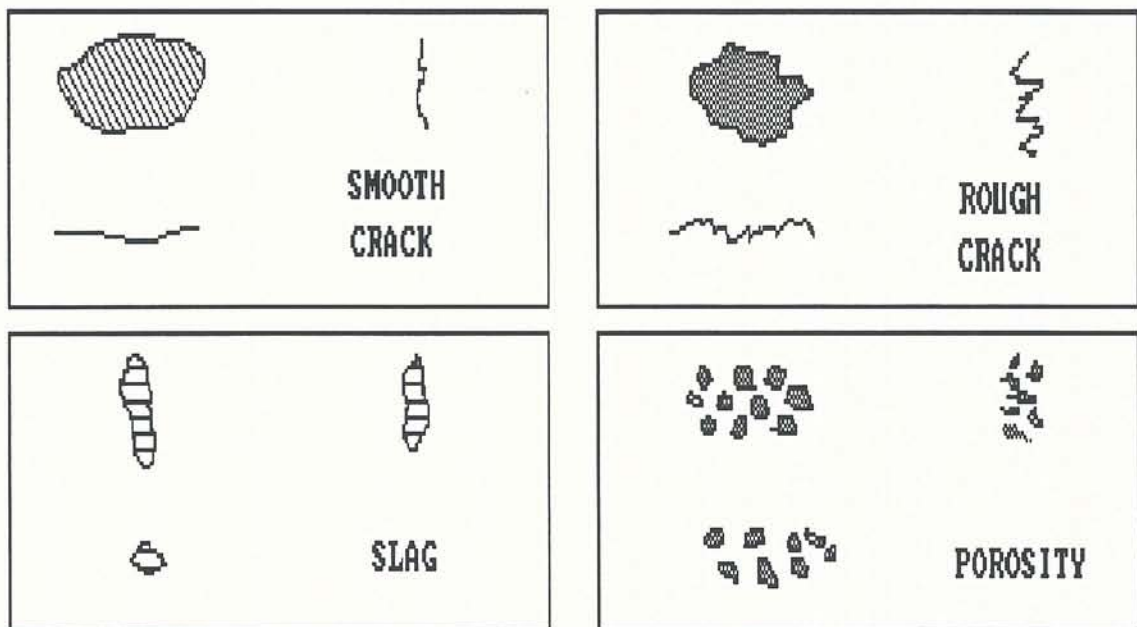
Con riferimento alla figura 1.1a, un sistema sperimentale è stato realizzato per produrre immagini tridimensionali, formate affiancando le immagini B-scan acquisite in differenti posizioni lungo la direzione Y della saldatura. La quarta dimensione è fornita dall'angolo della sonda. Nel nostro caso abbiamo impiegato sonde trasversali inclinate a contatto ed il valore di tale angolo è assunto tra quelli standard per i controlli non distruttivi: 45°,60°,70°. Con queste inclinazioni era possibile coprire con una sola scansione l'intera zona della saldatura mediante un rimbalzo del fascio ultrasonico sul



(a)



(b)

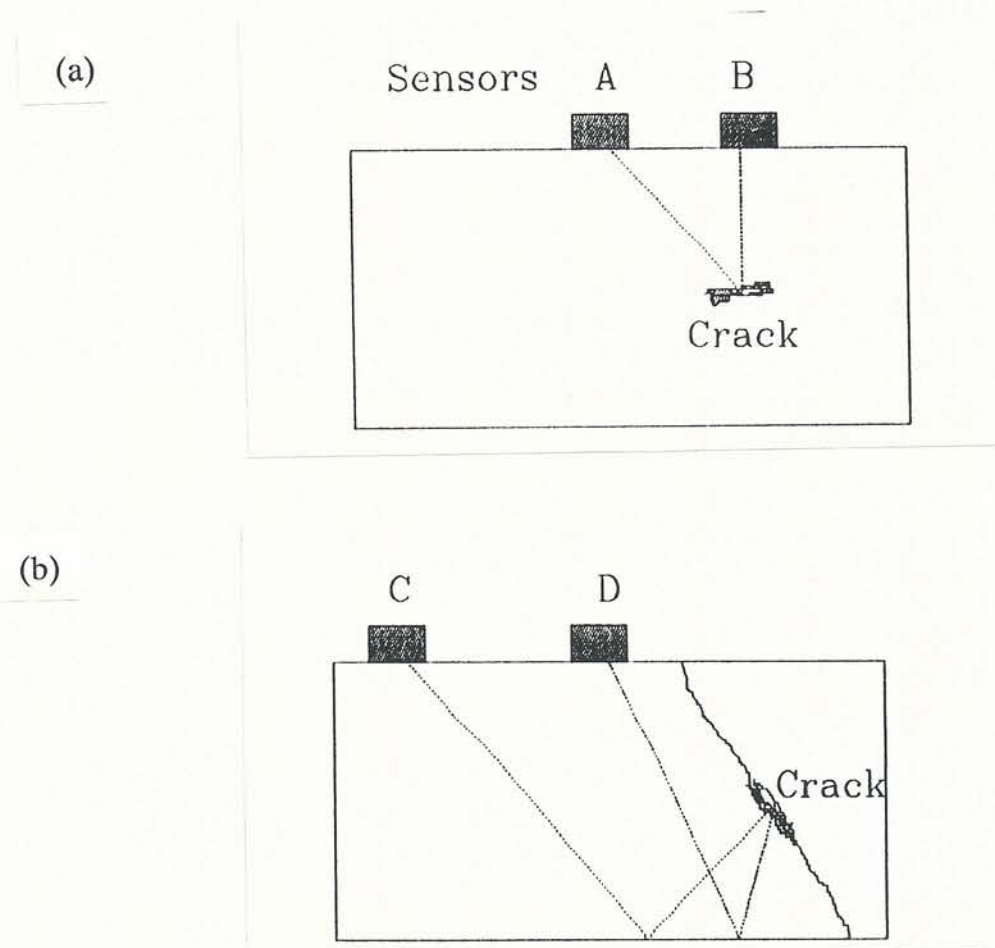


**Figura 1.1.** (a) Sistema di acquisizione dati tridimensionali con sonde a contatto angolate. (b) Forme caratteristiche dei quattro tipi di difetto: vista secondo le tre proiezioni X,Y,Z.



fondo pezzo (tecnica "half-skip").

Anche il data base di 66 difetti di Burch et al. [1.4], assumeva questa convenzione per il sistema di riferimento, ma in quel caso la geometria dell'esperimento era differente. I difetti dei diversi tipi, erano stati artificialmente inseriti in blocchi metallici e disposti parallelamente alla superficie di ispezione. Il set di dati anche in questo caso assumeva il sistema di coordinate X,Y,Z ma l'angolo di incidenza era usualmente  $0^\circ$  e  $20^\circ$  e quindi utilizzava un percorso pulse-echo diretto senza rimbalzi sul fondo pezzo. Inoltre il sistema di acquisizione funzionava con sonde ad immersione, garantendo così una buona riproducibilità ed una buona flessibilità per l'angolo di incidenza. In figura 1.1b sono riportati schematicamente le forme caratteristiche dei 4 tipi di difetto secondo tre proiezioni ortogonali.



**Figura 1.2.** (a) Ispezione con sonde ad immersione su difetti planari. (b) Ispezione con sonde angolate a contatto di saldature a V mediante riflessione su fondo pezzo.

In figura 1.2a è riportato il metodo usato per acquisire il database di immagini, mentre in figura 1.2b la geometria relativa al caso reale di ispezione di una saldatura a V.

Un problema tipico della classificazione è quanto essa sia effettivamente influenzata dal formato della immagine presentata in ingresso, ovvero le sue dimensioni, il passo di campionamento spaziale lungo X,Y,Z e l'intensità media dell'immagine. Nei prossimi paragrafi sono riportate alcune osservazioni in merito a questo problema, mentre ora si forniscono indicativamente le risoluzioni utilizzate per gli esperimenti: 0.5 mm in profondità, 1 mm lungo la direzione X della scansione, 2 mm lungo la direzione Y della saldatura e 256 livelli di grigio (8 bit per pixel).

La geometria dell'esperimento ha una forte influenza sul trattamento di questi dati perchè la propagazione degli ultrasuoni cambia nei due casi. Infatti le ampiezze del segnale dipendono dalla lunghezza del percorso avanti ed indietro come anche dal coefficiente di riflessione che dipende dall'angolo di incidenza sulla faccia della saldatura. Questi fenomeni avevano una influenza molto minore nelle misure effettuate per creare il database di difetti e quindi è stato necessario mettere a punto un sistema per rendere compatibili i due set di misure. Si sono individuati due metodi per compensare le variazioni di ampiezza del segnale:

- 1) Definita la massima lunghezza del percorso per la particolare misura, il sistema può essere preventivamente calibrato su un blocco-campione con un foro laterale posto a questa distanza dal centro della sonda ("beam entry point")
- 2) Quando le distanze impiegate sono nella zona di campo lontano della sonda si può effettuare una compensazione di ampiezza mediante elaborazione numerica del segnale basata su stime teoriche dell'attenuazione o secondo una curva di calibrazione tabulata. Questi metodi conosciuti come DGS (Depth Gain Sensitivity) sono normalmente applicati a distanze pari a tre volte il campo vicino.

Gli effetti sulla classificazione della compensazione di ampiezza saranno discussi successivamente nella descrizione delle misure sperimentali. Per quanto riguarda il modulo di programma preprocessore le sue principali funzioni sono:

- Centraggio dell'immagine mediante il calcolo del centro di gravità
- Operazione di soglia e normalizzazione dell'ampiezza
- Operazione di media su una cella di risoluzione (voxel) generalmente più grande di quella originale



L'operazione di centraggio è basata sulla definizione del centro di gravità dell'immagine originale. Una volta che questo punto caratteristico è stato trovato, l'immagine da elaborare è estratta da quella originale e centrata sul centro di gravità. Il centro di gravità viene generalmente stimato al meglio sull'immagine tridimensionale relativa all'acquisizione con la prima sonda, il cui angolo è tale da avere il fascio ultrasonico perpendicolare alla faccia della saldatura. Infatti includendo anche il secondo angolo si rischia di peggiorare la stima della posizione del centro di gravità, in quanto l'immagine può contenere pixel con un basso valore dovuto ad una incidenza non perpendicolare sulla faccia della saldatura.

L'integrazione è fatta su tutti i pixel dell'immagine tridimensionale (od eventualmente su entrambi gli angoli) fornendo le coordinate  $X_g, Y_g, Z_g$  del centro di gravità dell'immagine  $I(X, Y, Z, \alpha = \text{angolo di incidenza})$ :

$$\begin{aligned} X_g &= \frac{\sum_{x,y,z,\alpha} X \times I(X, Y, Z, \alpha)}{\sum_{x,y,z,\alpha} I(X, Y, Z, \alpha)} \\ Y_g &= \frac{\sum_{x,y,z,\alpha} Y \times I(X, Y, Z, \alpha)}{\sum_{x,y,z,\alpha} I(X, Y, Z, \alpha)} \\ Z_g &= \frac{\sum_{x,y,z,\alpha} Z \times I(X, Y, Z, \alpha)}{\sum_{x,y,z,\alpha} I(X, Y, Z, \alpha)} \end{aligned} \tag{1.1}$$

Il valore trovato per il centro di gravità è poi arrotondato al pixel più vicino.

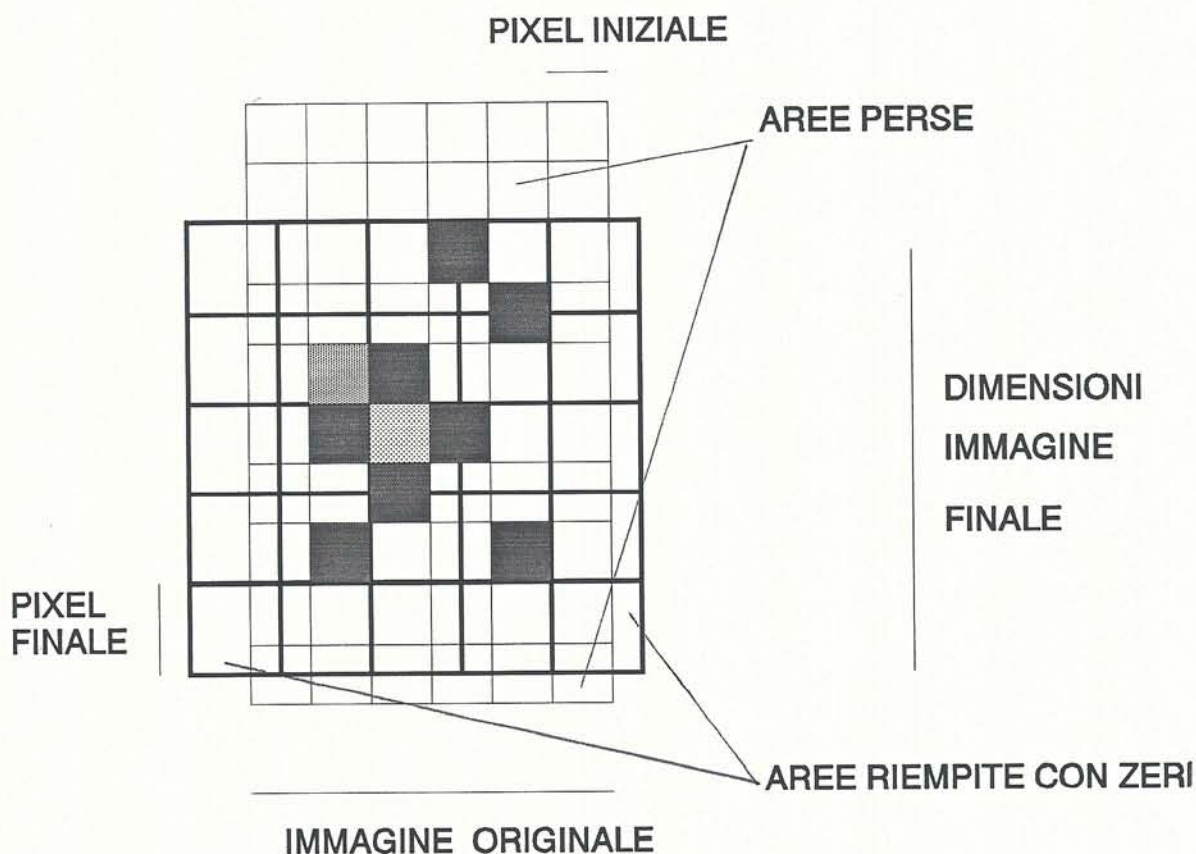
La seconda operazione è quella di definire una soglia ed eventualmente un valore minimo ai pixel da considerare per la successiva operazione di media. Un test preliminare sul rapporto segnale rumore dell'immagine viene fatto calcolando un parametro legato al rapporto segnale rumore. Siano max e min il massimo e minimo valore dei pixel dell'immagine: se  $(\text{max}-\text{min})/\text{min}$  è inferiore a 2 l'immagine è scartata ed il processo di classificazione abortito.

Un test simile viene fatto calcolando l'intensità media dell'immagine che se troppo bassa potrebbe fornire un valore non affidabile del centro di gravità.

La nuova immagine dovrebbe avere dimensioni simmetriche rispetto al centro di gravità

e quindi abbiamo ristretto le nostre analisi alle sole dimensioni dispari.

Fissate le dimensioni della nuova immagine può accadere che alcune parti dell'immagine originale non siano comprese che quindi vengono scartate, oppure può accadere che parti della nuova immagine rimangano vuote perchè non sovrapposte all'immagine originale. In quest'ultimo caso il software provvede automaticamente al riempimento di tali pixel con il valore di fondo fissato per la nuova immagine. In figura 1.3 è riportato schematicamente questo processo per il caso bidimensionale.



**Figura 1.3.** Processo di centraggio e media sull'immagine originale per il caso bidimensionale.

Il processo di posizionamento sul centro di gravità può essere ripetuto in modo iterativo in quanto alcune parti della nuova immagine non sono riempite ed un nuovo centro di gravità viene ricalcolato finché non è ottenuta la convergenza.

Il processo di media produce un'immagine con dimensioni dei voxel generalmente più grandi di quella originale. La media viene calcolata su un numero di pixel che in generale è differente lungo i tre assi cartesiani per aggiustare le risoluzioni dei dati originali con quelle richieste per la nuova immagine.



La scelta migliore per la dimensione del voxel è rappresentata dal compromesso tra l'esigenza di ridurre il numero di pixel da elaborare e quella di conservare le caratteristiche essenziali dell'immagine. Può essere verificato facilmente che una dimensione del pixel eccessiva riduce qualsiasi tipo di difetto ad un'immagine con il solo pixel centrale attivo che risulta per il classificatore simile ad un difetto tipo "slag".

L'ultima operazione svolta dal preprocessore è quella di normalizzazione dell'ampiezza. L'ampiezze delle immagini B-scan sono ottenute dopo la rivelazione analogica del segnale a radiofrequenza e con una digitalizzazione su 256 livelli di grigio.

Come in altri problemi di analisi dell'immagine qui si suppone che la distribuzione delle ampiezze contenga tutte le informazioni necessarie per la classificazione e quindi si trascura il contributo informativo della fase del segnale.

La dinamica originale su 256 livelli è stata poi ridotta mettendo una soglia al 1% del valore massimo dell'immagine. Poi i valori delle ampiezze sono normalizzati in ampiezza con valori tra 1 e 999. Questo metodo di normalizzazione di ampiezza ha permesso di trascurare dettagli non essenziali alla classificazione. Inoltre si ha il vantaggio di poter cambiare le dimensioni dell'immagine da classificare senza cambiare la distribuzione dell'ampiezze.

In figura 1.4 è riportata in vista prospettica una risposta tipica per ogni tipo di difetto classificabile nella saldatura dopo il preprocessore. Le dimensioni dell'immagine in figura 1.4 sono  $7 \times 7 \times 2$  pixel. In figura 1.4 le ampiezze rappresentano il valore dell'intensità del segnale ultrasonico riflesso, mentre il pixel nell'angolo in basso rappresenta il valore massimo fissato dalla normalizzazione di ampiezza. Gli angoli considerati sono rispettivamente  $0^\circ$  e  $20^\circ$  rispetto alla direzione perpendicolare della superficie di ispezione.

### **1.3 Sistema per la classificazione automatica dei difetti in tempo reale**

In questo paragrafo è descritta la realizzazione del sistema dimostrativo per la classificazione in linea di difetti su saldature a V in acciaio, che è stato realizzato nella fase finale del progetto europeo ANNIE. I vari moduli di programma furono sviluppati in linguaggio FORTRAN ed inseriti nel software residente nel sistema ZIPSCAN. In seguito il nucleo di programmi è stato ampliato e sviluppato in linguaggio C per il nuovo

Angolo 0°

Angolo 20°

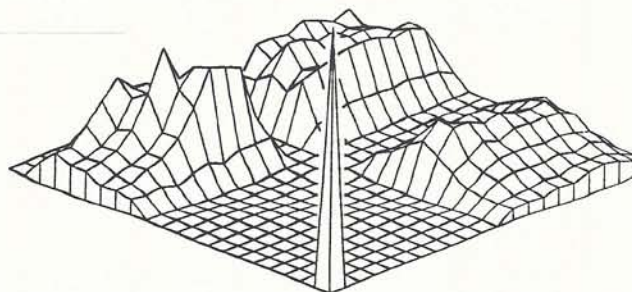
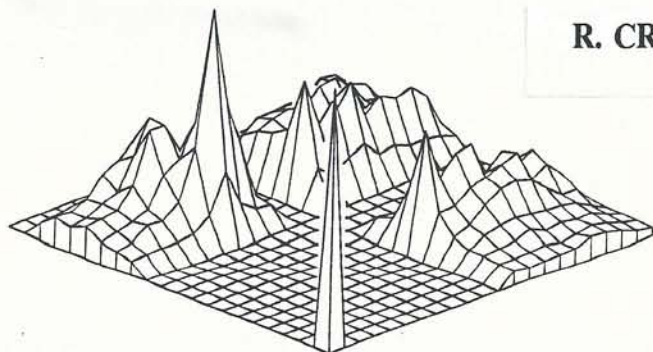
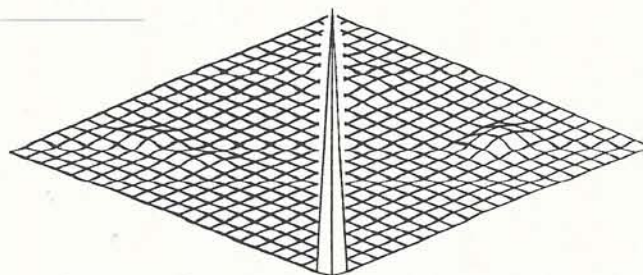
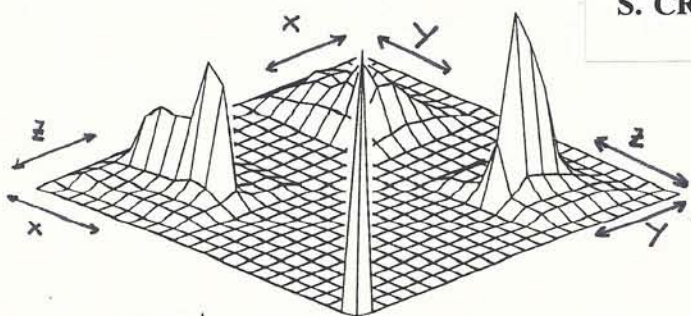
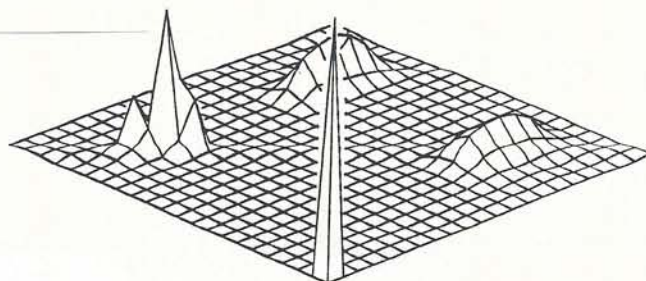
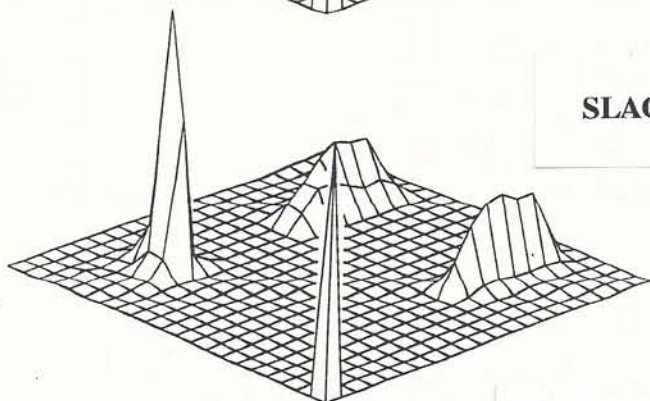
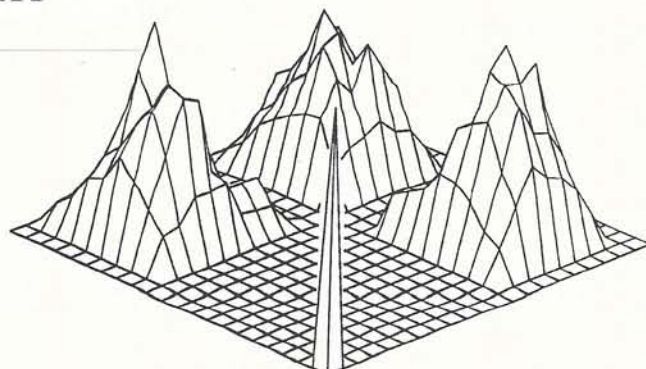
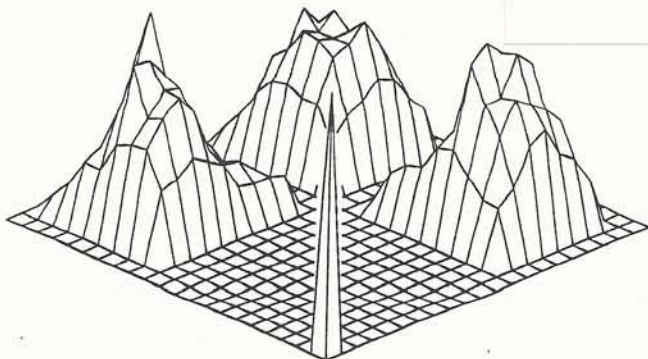
**R. CRACK****S. CRACK****SLAG****POROSITY**

Figura 1.4. Immagini pre-elaborate dei difetti tipici per ogni tipo. I dati sono mostrati in vista prospettica in funzione della posizione in tre dimensioni X,Y,Z e secondo gli angoli 0° e 20°.



sistema HFD-2. Lo scopo di questo sistema è quello di verificare le potenzialità della classificazione in tempo-reale offerte dalla velocità dei metodi di classificazione applicabili direttamente alle immagini acquisite. Inoltre la possibilità di una classificazione in tempo reale risulta l'obiettivo primario per le applicazioni industriali di routine.

### **1.3.1 Il sistema di acquisizione dati ZIPSCAN e HFD-2 sviluppato dal NNDTC della Harwell Laboratory**

Il sistema ZIPSCAN sviluppato dal National Non Destructive Centre della Harwell Laboratory ha caratteristiche di flessibilità sia nel front-end che nel software che lo rendono facilmente adattabile a molti problemi nel campo dei controlli non distruttivi [1.16]. Inoltre fu appositamente studiato per essere inteso anche come sistema di sviluppo di nuove tecniche di acquisizione ed elaborazione dei segnali e delle immagini. Un programma di acquisizione consente di controllare tramite una CPU master sul CAMAC Crate bus del sistema ZIPSCAN i parametri dell'acquisizione. Senza soffermarsi sui dettagli possiamo dire che il programma di acquisizione è interfacciato in overlay con il sistema MDS (Menu Driven System) per ricevere i dati in ingresso tramite un menu sul monitor del sistema e la tastiera. Il movimento realizzato dalle due sonde sulla superficie del blocco contenente la saldatura è quello mostrato in figura 1.1. In una prima versione del programma il movimento lungo la direzione della saldatura era manuale ed il programma istruiva l'operatore degli incrementi da apportare su una guida calibrata a basso attrito, sulla quale poteva scorrere il blocco di acciaio. Nella nuova versione con il sistema HFD-2, l'acquisizione sarà gestita da un carrello robotizzato MIMIC, gestito da personal computer con sistema operativo DOS. Dopo l'acquisizione, l'immagine B-scan è trasferita su un file temporaneo sulla memoria dello ZIPSCAN. Poi tutte le immagini sono fuse in un unico file con formato compatibile ZIPSCAN.

Lo stesso volume viene poi investigato con un'acquisizione secondo un altro angolo, con il programma di acquisizione che provvede automaticamente al cambio della sonda e all'aggiustamento dei parametri di scansione in virtù del nuovo angolo.

Le sonde utilizzate sono ad onde trasversali a contatto con angoli rispettivamente

60°, 45° e 70° e frequenza centrale 4 MHz e banda a -6dB di circa 3 MHz. L'angolo principale è di 60° pari all'inclinazione delle saldature a V da investigare. Le due sonde sono montate in linea sullo stesso carrello scorrevole il cui movimento è controllato da un motore passo-passo. Le sonde sono alloggiare in un apposito sistema di sospensione ammortizzato a forcella per garantire un buon accoppiamento meccanico tra la sonda e la superficie del blocco di acciaio. L'utilizzo delle onde trasversali permette una migliore risoluzione a parità di frequenza con le onde di compressione, anche se si deve applicare una opportuna finestra temporale per evitare l'acquisizione dei segnali spuri generati dalla conversione di modo.

Un risultato rilevante ottenuto con questo lavoro è stata l'analisi degli effetti della calibrazione delle sonde. Ricordando che il database di difetti era stato generato tramite l'acquisizione con una singola sonda ad immersione, in questo caso si sono osservate notevoli variazioni dell'intensità media dei segnali ricevuti secondo i due diversi angoli. A prescindere dal fatto che ad angoli diversi corrispondono percorsi con diversa lunghezza, le differenze di ampiezza si possono spiegare con il fatto che nel nostro caso le sonde hanno caratteristiche costruttive diverse tra loro. Ad esempio diverse dimensioni del cristallo, diversi tipi di materiale per lo zoccolo triangolare e quindi diversa efficienza. Per ricondursi alle stesse condizioni sperimentali adottate per il database di difetti si è eseguita una calibrazione delle sonde su blocchi di calibrazione tipo V1. Con questo tipo di calibrazione si stabilisce per ogni sonda il ritardo introdotto internamente alla sonda, il centro del fascio ultrasonico emesso, l'angolo effettivo ed un fattore di sensibilità. Tutte queste informazioni sono poi memorizzate in un file di calibrazione delle sonde nel sistema ZIPSCAN e vi si accede durante ogni acquisizione. Tramite queste informazioni relative ad ogni sonda è possibile equalizzare i dati acquisiti con ovvi vantaggi sui risultati della successiva classificazione.

Considerando che la frequenza di campionamento del segnale era 20 MHz è stato necessario applicare una compressione dei dati per limitare l'occupazione di memoria su disco fisso. La compressione dei dati scarta un certo numero di campioni in base alla risoluzione richiesta con il menu d'ingresso che risulta generalmente maggiore di quella ottenibile.

I dati acquisiti sono possono essere presentati ed elaborati sul sistema ZIPSCAN oppure trasferiti tramite il programma di comunicazione seriale KERMIT su un'altra unità.



Infine nella figura 1.5 è riportata una vista del sistema di acquisizione basato sul sistema ZIPSCAN.



**Figura 1.5.** Sistema di classificazione in linea basato sul sistema di acquisizione ed elaborazione dati ultrasonici ZIPSCAN. Una sonda a contatto sul blocco con saldatura a V e' mostrata in basso a destra.

### 1.3.2 Modulo di programma di pre-elaborazione

In questo paragrafo è descritto il modulo di programma preprocessore sviluppato per il nuovo sistema di acquisizione HFD-2 basato su personal computer MS-DOS. Il nucleo di questo programma era già stato sviluppato in linguaggio FORTRAN sul sistema ZIPSCAN. Il sistema HFD-2 (Harwell Flaw Detector Version 2) è un sistema integrato per l'acquisizione e l'elaborazione dati in ambiente DOS e gestito da un sistema a menu chiamato PCMENU sviluppato appositamente per questo sistema. Il processore è un



Intel 80386 a 25 MHz o compatibile. A prescindere dalle migliori caratteristiche tecniche di questo nuovo sistema rispetto allo ZIPSCAN, esso ha il grande vantaggio di poter utilizzare tutto il software disponibile per personal MS-DOS ed in particolare gli ambienti di sviluppo integrati tipo Microsoft Quick C e Microsoft Fortran, cosa che non era possibile sul sistema ZIPSCAN con sistema operativo RT11.

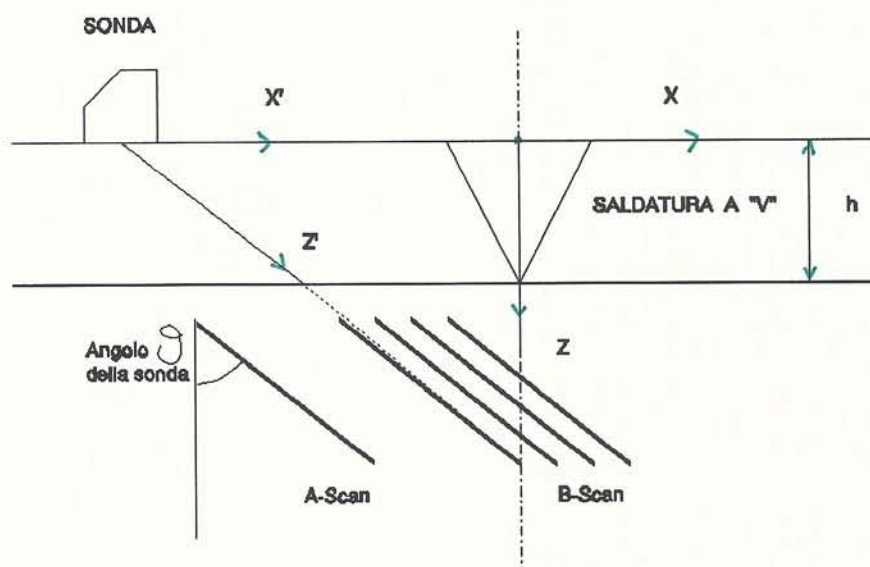


Figura 1.6. Sistemi di riferimento utilizzati per il processo di rotazione.

In particolare è stata scelta l'opzione del linguaggio C sia per la buone possibilità in termini di velocità di esecuzione e soprattutto per la possibilità di gestire una scheda grafica ad elevata risoluzione. La scheda utilizzata è una Paradise SuperVga o Orchid ProDesigner con 640x480 pixel e 256 colori.

Il modulo preprocessore svolge tutte le funzioni descritte nel paragrafo 1.2. Tuttavia è stato necessario modificare il programma originale in quanto il sistema di riferimento nel quale sono acquisiti i dati è diverso da quello con cui sono stati insegnati i classificatori. Infatti con la prima versione del sistema dimostrativo su ZIPSCAN fu osservato che a causa dell'impiego di sonde angolate le immagini acquisite non erano consistenti con quelle del database di difetti. I risultati della classificazione erano scarsi anche quando era evidente il tipo difetto contenuto nelle immagini. Con riferimento alla figura 1.6, il modulo preprocessore compie una rotazione tutti i pixel prima di ogni altra operazione seconda la seguente trasformazione:



(1.2)

$$Z = 2 h - Z' \cos \theta$$

$$X = X' + Z' \sin \theta$$

Il modulo preprocessore accetta in ingresso i parametri tramite un menu richiamabile dal menu principale, come mostrato nella seguente figura.

4-D Preprocessor before classification		
File to process(without ext.)-> %%		
Probe chosen ("1","2" or "B"oth) %		
Output file number = %		
Image parameters:		
X axis: number of pixels (3-11) = %%	pixel size = %%%%%%%%% mm	
Y axis: number of pixels (3-11) = %%	pixel size = %%%%%%%%% mm	
Z axis: number of pixels (3-11) = %%	pixel size = %%%%%%%%% mm	
Minimum level in destination image (0-20) = %%		
Maximum threshold for the center of gravity (1-80) = %%		
Level of output messages (0-2) --> %		
%%%	%%%	%%%

Figura 1.7. Menu dei parametri di ingresso per il modulo preprocessore.

Oltre ai vari parametri relativi alle dimensioni e le ampiezze dell'immagine da generare, tramite il menu del modulo preprocessore si può scegliere su quale set di dati si vuole la classificazione, selezionando una delle due sonde oppure entrambe.

Una routine grafica di utilità è stata sviluppata per aumentare la comprensione dei dati elaborati.

Con un valore compreso tra 0 e 2 si può variare la quantità di informazioni mostrate sullo schermo ad alta risoluzione. Con il più alto livello di messaggi in uscita il programma preprocessore fornisce sia informazioni di tipo numerico in una regione dello schermo sia le immagini a livelli di grigio dei dati originali acquisiti. In particolare il programma scala automaticamente tutte le dimensioni delle immagini originali per farle rientrare nello schermo. Inoltre è stata aggiunta sulla parte grafica una semplice presentazione della scala metrica relativa all'esperimento. In questo modo l'utilizzatore

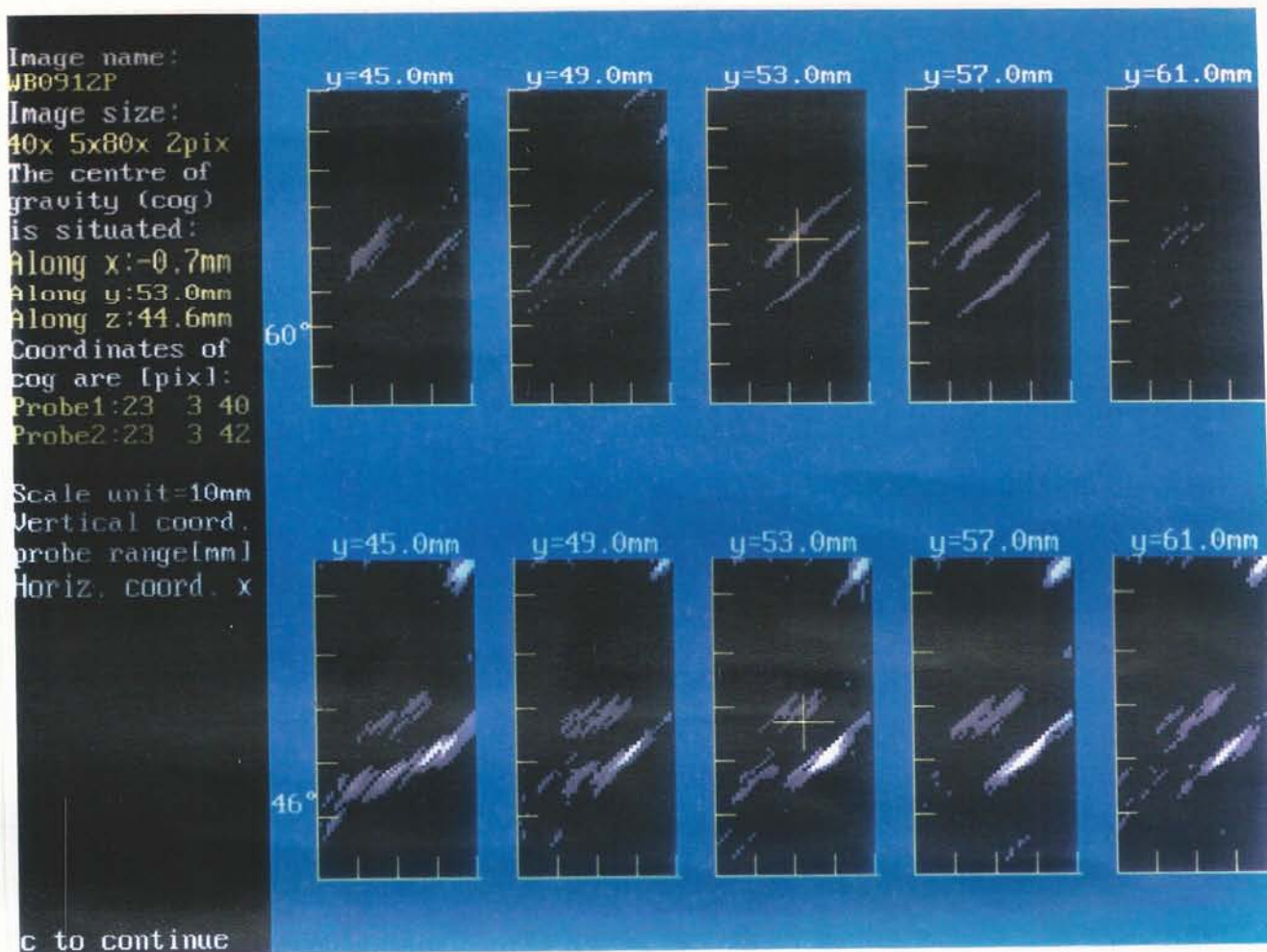


Figura 1.8. Presentazione sullo schermo grafico dei risultati del programma preprocessore.

ha una visione immediata della posizione  $X, Y, Z, \alpha$  di ogni pixel sulla saldatura. Come vedremo in seguito abbiamo trovato estremamente utile fornire informazioni di tipo quantitativo circa la posizione delle varie sezioni sulla saldatura, poichè anche per la classificazione la presenza di un tipo di difetto in una certa area della saldatura è più probabile che in una altra. In figura 1.8 è mostrata l'uscita della schermo a colori del preprocessore con il livello più alto di informazioni. Il file di dati è relativo ad un campione contenente un difetto di porosità ed i dettagli di questa misura saranno dati nel paragrafo 1.4.

Il volume con la zona difettata è stata scandita con 5 sezioni B-scan ogni 4mm. Per ogni sezione viene riportata in alto in colore bianco la posizione  $Y$  lungo la saldatura rispetto ad un riferimento di zero convenuto sul campione. Le immagini in alto sono le sezioni B-scan relative all'angolo principale pari a  $60^\circ$  indicato alla sinistra delle immagini in



colore bianco, mentre quelle in basso relative alla seconda sonda a  $46^\circ$ . Si noti che l'angolo nominale della sonda era  $45^\circ$  ma dalla calibrazione era stato trovato un angolo di  $46^\circ$ . Il programma legge automaticamente questo dato nel file di calibrazione della sonda e lo utilizza nell'elaborazione. L'effetto delle incertezze dei valori nominali sull'errore totale sarà oggetto di alcune osservazioni nel paragrafo 1.6.

Il centro di gravità ("Centre Of Gravity") è mostrato con una croce di colore giallo sovrapposta all'immagine a livelli di grigio, mentre le sue coordinate in pixel ed in valore reale sono riportate sulla parte sinistra dello schermo. Ogni immagine è affiancata da una scala metrica che rappresenta il sistema di riferimento  $X',Z'$  solidale con la sonda, come indicato in figura 1.6. La coordinata  $X'$  è quella orizzontale e  $Z'$  quella verticale. Le coordinate reali in mm del centro di gravità sono fornite invece nel sistema di riferimento principale  $X,Y,Z$ . Si noti l'accuratezza della stima del centro di gravità con  $X_g = -0.7$  mm e  $Z_g = 2 \cdot 30 - 44.6 = 15.6$  mm (spessore del campione  $h = 30$  mm), considerando il volume esteso di questo tipo di difetto che è di circa 10 mm lungo la direzione  $Y$ . La zona di porosità è effettivamente situata sulla sezione circa sull'asse centrale della saldatura a V ed a metà dell'intero spessore  $h$ .

Infine una ultima osservazione sul debugging del programma. La nuova versione del programma in linguaggio C consiste in circa 1000 linee di programma. Tale dimensione se pur non eccessivamente grande comporta alcuni problemi di debugging. È stato di grande aiuto la possibilità di effettuare dei confronti sui risultati finali con due versioni del nucleo di base del preprocessore: la prima sviluppata in linguaggio FORTRAN per sistema operativo RT-11 e la seconda in linguaggio C per sistema DOS. Il debugging è avvenuto non solo durante la fase di traduzione e adattamento del programma in C ma anche controllando che entrambi i programmi fornissero gli stessi risultati partendo dagli stessi dati in ingresso. A parte alcuni problemi di approssimazione dovuta all'aritmetica finita, le immagini prodotte in uscita sono sempre state identiche fornendo così un valido test per il debugging.

### **1.3.3 Modulo di programma per la classificazione**

Tra i vari metodi di classificazione rivisti nel progetto ANNIE sono stati scelti il metodo del campo ricettivo adattivo tra i metodi di classificazione convenzionali ed una rete

neurale con campo ricettivo connesso ad una rete MLP (Multi Layer Perceptron). Senza soffermarsi in dettaglio sui metodi basati sul campo ricettivo introdotti da Fukushima con il "neocognitron neural network model" [1.17], possiamo dire che in questa applicazione sono sfruttati per creare un sistema ibrido con le caratteristiche di adattabilità delle reti neurali e ed un limitato numero di variabili dovute alle piccole dimensioni del campo ricettivo. In questo modo si è potuto contenere le dimensioni del classificatore riducendo anche i problemi di sovra-apprendimento (over learning) durante la fase di costruzione della rete.

Questi due metodi di classificazione sono stati scelti per le loro buone prestazioni in confronto agli altri metodi analizzati e la limitata complessità di calcolo. Inoltre questi due tipi di classificatori hanno un comportamento complementare per quanto riguarda i confini di decisione tra le classi: il classificatore basato sul criterio di minima distanza dal campo ricettivo è adatto quando il confine è approssimativamente lineare, mentre la rete neurale funziona meglio quando il confine ha una forma più complessa. I campi ricettivi per entrambi i classificatori sono stati calcolati separatamente tramite un pacchetto software sviluppato nell'ambito del progetto ANNIE. La fase di apprendimento dei classificatori ha impiegato il database di difetti creato da Burch et al. [1.4], mentre per la fase di test si è impiegato il metodo LOO (Leave One Out). La fase di test sul data base di 66 difetti ha fornito prestazioni con successo del 100% per campi ricettivi con dimensioni  $3 \times 3 \times 3 \times 2$ . Per la rete neurale sono state provate diverse topologie con 3, 4 e 5 unità nascoste e con 4 classi di uscita. Anche per la scelta delle dimensioni del campo ricettivo, le prestazioni migliori sono state ottenute con  $3 \times 3 \times 3 \times 2$  pixel, anche se è possibile una classificazione con dimensioni pari a  $5 \times 5 \times 5 \times 2$ . Viste le prestazioni del tutto simili si è scelta la configurazione minima con sole 3 unità nascoste anche se viene lasciata la scelta all'utilizzatore tra una delle tre configurazioni.

Anche in questo caso il modulo di programma del classificatore è interfacciato al software di base del sistema HFD-2 tramite un menu, come mostrato in figura 1.9.



Classify a 4-dimensional defect		
Image File to process(without ext.)--> %%		
Image file number = %		
Classifier => %      0 =Adaptive ; 1=Back Propagation ; 2=Both		
Receptive Field Size => %      ( 3 or 5 only )		
For Adaptive Receptive Field: percentage of RF outside valid image =>%		
For Back Propagation: Number of hidden units => %      ( 2 or 3 only)		
Classes N or Y: Porosity=>%    Slag =>%    Smooth Crack =>%    Rough Crack =>%		
Exponent for RF correction factor => %%%%%%%%%		
Level of output messages (0-2)    --> %		
%%%	%%	%%%

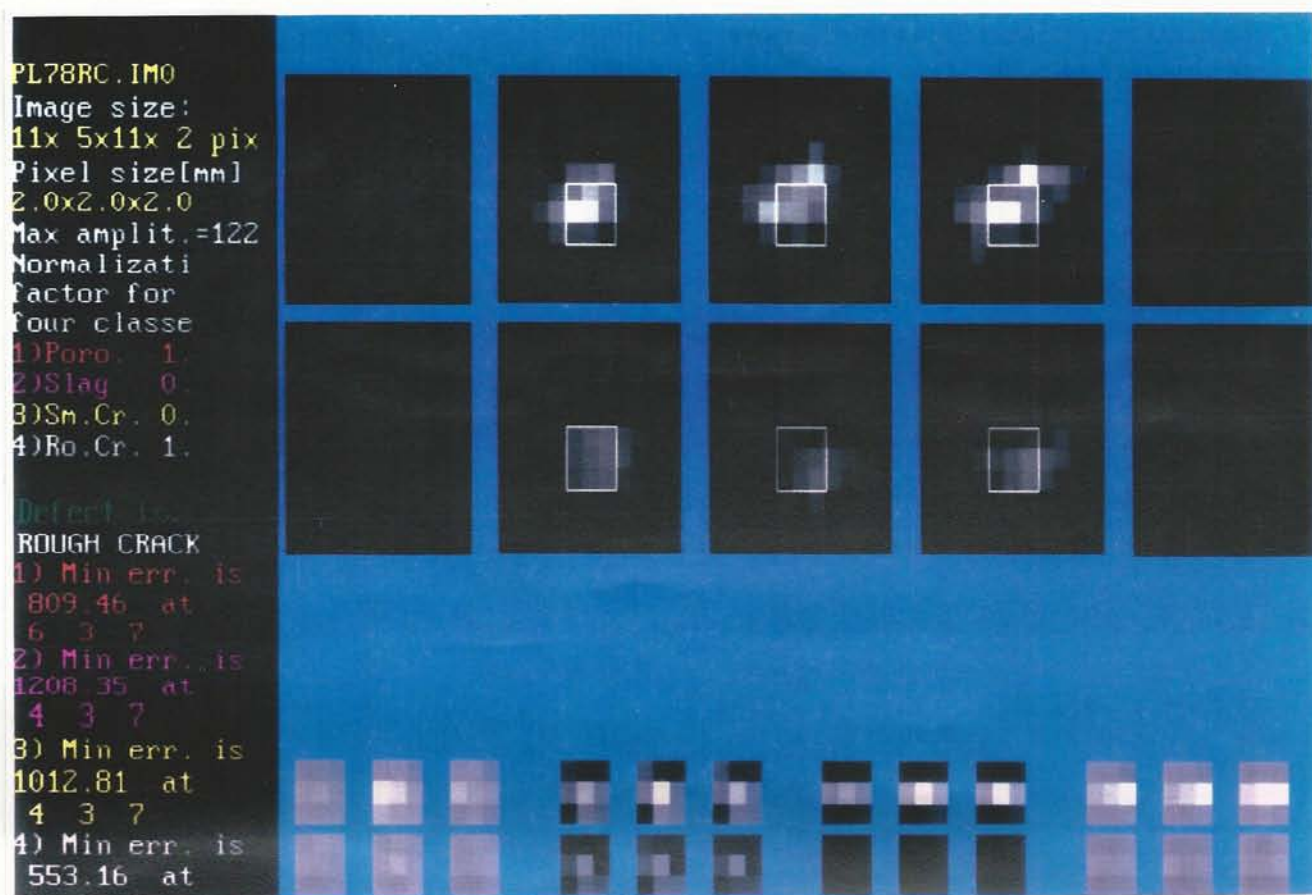
Figura 1.9. Modulo di programma per la classificazione automatica: menu dei parametri di ingresso.

Tra i vari parametri di ingresso si noti la possibilità di selezionare solo alcune tipi di difetto per la classificazione. Mentre per i metodi neurali questa opzione non ha nessuna influenza sulla risposta finale, con il metodo del campo ricettivo adattivo può essere utile per risolvere casi dubbi tra due soli tipi di difetti.

Il fattore RF normalmente fissato al valore 0.6 può essere variato per pesare più o meno le varie le immagini del campo ricettivo. Questo fattore stima la somma delle intensità di ogni campo ricettivo selezionato sull'immagine e la pesa secondo il valore dell'esponente RF. Poi i valori in uscita dal classificatore sono nuovamente equalizzati per ogni classe secondo questi pesi. Può essere utile per rendere più sensibile la classificazione ai difetti tipo porosità o cricche a fatica in cui si hanno molti pixel ad elevata intensità.

In figura 1.10 è mostrata l'uscita grafica del programma sullo schermo ad alta risoluzione a colori.

Come nel caso del preprocessore lo schermo è diviso in una parte con informazioni numeriche (lato a sinistra) ed una parte con immagini. La figura 1.10 si riferisce ad un esempio di classificazione con campo ricettivo adattivo. Le immagini rappresentate in



**Figura 1.10.** Presentazione sullo schermo grafico dei risultati del classificatore in linea. Classificatore con campo ricettivo adattivo.

figura sono quelle ottenute in uscita dal modulo preprocessore e si riferiscono ad un'acquisizione di un difetto tipo cricca a fatica (Rough Crack).

In basso sono riportati i quattro campi ricettivi caratteristici relativi ad ogni tipo di difetto.

Le quattro classi sono identificate con un numero progressivo e diversi colori. I quattro campi ricettivi sono scanditi a turno su tutta l'immagine fino a trovare la posizione con la minima distanza. Durante la classificazione si può chiedere al programma di indicare per ciascuna classe la posizione con minima distanza, tramite la sovrapposizione di un box dello stesso colore della classe corrente.

Si noti come nel caso del campo ricettivo adattivo il metodo di classificazione sia estremamente intuitivo anche per l'utilizzatore. I campi ricettivi calcolati ricordano molto



quelli ideali di figura 1.1b, ed in questo caso non è difficile capire il processo di classificazione tramite l'aiuto della grafica. In figura 1.10 è mostrata la posizione di minima distanza con il difetto tipo cricca tramite il box di colore bianco. Il classificatore fornisce nella parte a sinistra i valori numerici delle distanze per le quattro classi e la risposta finale. Una persona con esperienza non avrebbe avuto in questo caso nessuna difficoltà analizzando l'immagine a classificare come una cricca a fatica, risposta peraltro confermata dal classificatore.

#### **1.4 Risultati preliminari su campioni con difetti reali**

Le prestazioni del metodo sono state dapprima verificate con una serie di dati sperimentali acquisiti in condizioni sperimentali differenti da quelle del database originale. La serie consiste in 38 esempi di difetti artificialmente prodotti in blocchi campione e messi a disposizione dal Welding Institute of Cambridge, Abington, Cambs., (UK). I dati sono stati acquisiti con il sistema ZIPSCAN e memorizzati in forma compressa su disco. Poi sono stati trasferiti su personal per la classificazione con il metodo del campo ricettivo adattivo. Per ogni campione erano stati acquisiti i dati secondo due angoli di incidenza pari a  $60^\circ$  e  $45^\circ$ .

Nella tabella 1.1 sono riportati i risultati relativi alla classificazione con il campo ricettivo adattivo.

La seconda colonna riporta l'esito della classificazione e nel caso sia corretto (OK) sono riportati i valori delle minime distanze trovate per ogni classe.

Tabella 1.1. Risultati con classificatore con campo ricettivo adattivo.

Data file	Output	Porosity	Slag	S. Crack	R. Crack
WB0941	Fail				
WB0931	OK	373	235	195	262
WB1042	OK	1093	1171	971	958
WB1031	OK	1770	1027	214	1102
WB1141	OK	746	894	668	644
WB1423	OK	1330	812	985	980
WB1411	Fail				
WB1412	OK	262	377	499	276
WB1712	Fail				
WB1421	Fail				
WB1422	Fail				
WB0832	Fail				
WB0141	Fail				
WB0121	OK	285	151	204	259
WB0911	OK	224	341	448	224
WB0822	OK	12.3	5.0	7.0	8.7
WB0831	OK	630	267	245	439
WB0641	OK	1.0	1.6	1.9	0.9
WB0142	Fail				
WB0231	OK	292	151	122	164
WB1741	OK	18	18	23	10
WB18131	OK	1019	1030	624	1200
WB18121	Fail				
WB421	OK	307	218	312	276
WB0123	OK	1059	672	691	805
WB0143	OK	1394	1630	1767	1248
WB0232	OK	1463	1254	960	1291
WB0241	OK	400	405	442	330
WB0242	OK	1208	1490	1460	1121
WB0221	OK	814	468	633	673
WB0421	OK	37	33	47	39
WB0422	OK	1768	1006	1295	1752
WB0423	OK	96	72	101	92
WB0531	OK	1013	479	307	810
WB0642	Fail				
WB0631	OK	1184	1109	530	872
WB0731	OK	1211	1527	833	958
WB0912	OK	106	330	545	181

Legenda per nome file di dati: WB xx y z, xx numero del blocco campione, y classe del difetto {1 Porosity, 2 Slag, 3 S.Crack, 4 R.Crack}, z numero progressivo dell'acquisizione



Prima della classificazione i dati originali sono stati pre-elaborati assumendo le dimensioni dell'immagine in formato standard pari a 11x5x11x2 pixel e con dimensioni nella maggioranza dei casi pari a multipli interi della risoluzione originale. Tipicamente le dimensioni della cella di risoluzione sono multipli interi di 0.86x2x1 mm, mantenendo così le proporzioni dell'immagine originale. Nei vari casi sono state trovati valori opportuni di soglia per adattarle al rapporto segnale rumore di ogni immagine.

Dai risultati ottenuti con questa verifica sperimentale preliminare si ricavarono alcune utili osservazioni per migliorare il metodo di indagine:

- su 38 esempi sono stati classificati correttamente 28 difetti ovvero il 73%,
- una più approfondita analisi dei casi errati mostrò che le intensità delle immagini originali relative ai due angoli non si accoppiava con quella prevista dai campi ricettivi caratteristici usati per la classificazione (vedi figura 1.10 in basso),
- in alcuni casi le immagini relative alla seconda sonda a 45° avevano una intensità troppo elevata dovuta ad una amplificazione troppo alta rispetto alla prima sonda ed un percorso degli ultrasuoni più breve,
- la classificazione delle cricche a fatica, generalmente presenti nell'apice inferiore della saldatura, è risultata difficile in quanto l'ispezione con la sonda a 45° non permetteva una completa scansione del difetto, risultando in immagini artefatte.

Da queste considerazioni si è pensato di operare nel seguente modo:

- inserire nella procedura di classificazione una fase di calibrazione delle sonde, in modo da equalizzare le risposte in ampiezza delle immagini e renderle consistenti con quelle dei difetti caratteristici
- aggiungere al sistema automatico di acquisizione tridimensionale una terza sonda con angolazione di 70° per l'indagine della zona dell'apice della saldatura.
- ripetere le acquisizioni su un blocco campione contenente ciascun tipo dei difetti.

Un nuovo set di misure è stato effettuato su un blocco di calibrazione PL78 con saldatura a V a 60°, spessore 30 mm, contenente un esempio per ciascun tipo di difetto. Una procedura di calibrazione è stata effettuata sulle due sonde con un riflettore

isotropo tipo foro laterale (S.D.H.) in modo da creare una curva di calibrazione che tenesse conto sia dell'attenuazione degli ultrasuoni alle varie distanze sia della differente efficienza delle sonde, seguendo il concetto che i segnali acquisiti con le due sonde alle stesse distanze dal foro devono essere uguali (condizione sperimentale che era alla base del database originale). Nel sistema ZIPSCAN il guadagno degli amplificatori delle due sonde, è programmabile via software. Il programma di acquisizione è stato modificato per cambiare in linea il guadagno del secondo amplificatore in base ai valori ottenuti dalla calibrazione. La qualità delle immagini è stata migliorata e le caratteristiche dei difetti sono meglio definite. I risultati della classificazione sul blocco PL78 con il campo ricettivo adattivo sono riportati in tabella 1.2. Le immagini sono pre-elaborate con dimensioni 11x5x11 pixel e 2x2x2 mm secondo i due angoli. In tabella 1.2 oltre ai risultati della classificazione sono riportati in seconda colonna la differenza di guadagno in dB dell'amplificatore della seconda sonda, in terza colonna la coppia di sonde utilizzate per l'acquisizione ed in quarta colonna la lunghezza minima massima del percorso ultrasonico con riflessione sul fondo pezzo.

**Tabella 1.2.** Risultati della classificazione con metodo del campo ricettivo adattivo con sistema automatico di calibrazione

Tipo di difetto reale	Differenza di guadagno [dB]	Angolo della coppia di sonde [gradi]	Lunghezza del percorso [mm]	Uscita classe 1 (Porosity)	Uscita classe 2 (Slag)	Uscita classe 3 (Smooth Crack)	Uscita classe 4 (Rough Crack)
Porosity	-2	60-45	80-100	<u>546</u>	1098	1683	798
Slag	-3	60-45	66-100	92	<u>75</u>	103	81
Smooth Crack	-2	60-45	80-112	1267	556	<u>112</u>	930
Rough Crack	+4	60-70	86-55	809	1208	1012	<u>553</u>

I quattro difetti sono stati classificati correttamente (vedi il valore sottolineato in tabella 1.2 corrispondente alla minima uscita) indicando l'importanza di una corretta acquisizione del sistema ma anche la sensibilità del metodo a variazioni di ampiezza di qualche dB. È importante notare che le misure sono state fatte avendo cura di un buon accoppiamento acustico delle sonde mediante l'uso di gel semifluido.

Con gli stessi dati si è eseguita una classificazione mediante il classificatore con rete neurale. La rete impiegata riceve gli ingressi da un campo ricettivo con dimensioni 3x3x3x2 pixel che scandisce l'immagine pre-elaborata in ingresso con dimensioni



11x5x11x2 e centrandosi sul pixel con maggiore trovato sull'immagine relativa alla prima sonda. La rete ha un livello intermedio con 3 unità nascoste e 4 uscite, una per ogni classe. I risultati della classificazione sul blocco PL78 sono riportati in tabella 1.3.

**Tabella 1.3.** Risultati della classificazione con metodo del campo ricettivo su rete neurale con sistema automatico di calibrazione

Tipo di difetto reale	Differenza di guadagno [dB]	Angolo della coppia di sonde [gradi]	Lunghezza del percorso [mm]	Uscita classe 1 (Porosity)	Uscita classe 2 (Slag)	Uscita classe 3 (Smooth Crack)	Uscita classe 4 (Rough Crack)
Porosity	-2	60-45	80-100	<u>0.98</u>	0.0065	0.0006	0.011
Slag	-3	60-45	66-100	<del>0.98</del>	0.005	0.0006	0.0144
Smooth Crack	-2	60-45	80-112	0.0025	0.021	<u>0.98</u>	0.0006
Rough Crack	+4	60-70	86-55	0.0017	0.001	0.051	<u>0.859</u>

In questo caso la risposta viene presa in base alla massima uscita (compresa tra 0-1) della rete neurale. Le classificazione ha fornito tre risposte esatte su quattro (valori sottolineati in tabella 1.3). Nel caso del difetto tipo slag la classificazione è errata, poiché viene classificata come una porosità. L'analisi dell'immagine mediata ha messo in evidenza che il metodo di posizionamento sul pixel con massimo valore risulta in questo caso inefficiente, in quanto nell'immagine considerata corrisponde ad una zona in cui non si ritrovano le caratteristiche tipiche del difetto tipo "slag". Come già osservato nella fase preliminare del progetto ANNIE per la classificazione con rete neurale si possono considerare metodi alternativi di posizionamento come ad esempio la zona sottesa dal campo ricettivo con massima somma di intensità o una combinazione dei due metodi. A differenza della rete neurale il metodo con il campo ricettivo adattivo esegue intrinsecamente un filtraggio adattato al tipo di difetto considerato, cercando la posizioni in cui si ha la minima distanza.

Infine un cenno ai tempi di calcolo per la classificazione completa in linea.

Sia il modulo preprocessore che classificatore sono sviluppati in linguaggio C, ma senza nessun accorgimento per migliorare la velocità del programma ed eseguiti su un processore i386 a 25 MHz senza coprocessore matematico. Con l'opzione della massima quantità di informazioni mostrate sul programma i tempi di esecuzione della pre-elaborazione e della classificazione sono valutabili nell'ordine delle decine di secondi. I metodi risultano sufficientemente veloci per essere usati in linea considerando che i

tempi di acquisizione sono sempre dell'ordine dei minuti.

### **1.5 Sistema di presentazione dati assistito dal calcolatore come supporto alla classificazione.**

La fase di prova dei classificatori in linea con questo nuovo set di dati sperimentali, è servita ad evidenziare alcuni problemi rilevanti per la classificazione.

Infatti dopo aver inserito la parte grafica nel modulo preprocessore con la scala metrica fu subito evidente l'importanza di rendere chiaro all'utilizzatore la posizione reale dell'immagine all'interno del blocco in prova. Per la classificazione è estremamente utile conoscere la posizione del difetto, poichè essa può essere correlata facilmente a certi tipi di difetto invece che altri. Per esempio un distaccamento lungo la superficie della saldatura è facilmente riconoscibile come una cricca piana (smooth crack) se fosse presentato tramite un sistema CAD sulla reale posizione della saldatura. Questo concetto può essere esteso pensando di assegnare alle varie zone della saldatura delle funzioni di probabilità per ciascun tipo di difetto, sfruttando così la conoscenza a priori sul problema. Perciò la ricerca è stata stimolata verso lo sviluppo di un nuovo modulo software per analizzare le immagini ad ultrasuoni tridimensionali sovrapposto ad un disegno in dimensioni reali della saldatura in coordinate reali. Un primo passo è stata la messa a punto di un semplice sistema CAD che fornisce una immagine di facile interpretazione che rispecchia la situazione reale dell'esperimento e quindi rende più consapevole l'utilizzatore del significato delle misure svolte. Allo stato attuale un modulo di programma in linguaggio C è sviluppato ed ha le seguenti caratteristiche:

- Selezione del tipo di saldature a doppio V (o X) o semplice V,
- Selezione dell'angolo della saldatura,
- Soglia e compressione della dinamica delle immagini presentate.

Il resto delle informazioni necessarie al disegno delle sezioni della saldatura sono recuperate direttamente dalla testata del file dati in formato ZIPSCAN. Il programma seleziona automaticamente tra le due possibili geometrie della saldatura e disegna la porzione dell'immagine solo nell'intorno della saldatura. Sempre automaticamente decide



## Capitolo 2

### **Tecniche avanzate di imaging ad ultrasuoni: tomografia per diffrazione a banda larga come metodo diretto per misure accurate dei difetti.**

#### **2.1 Introduzione sulle tecniche di immagini ad ultrasuoni ed organizzazione del lavoro svolto**

In questo capitolo verranno esposti i principi alla base di una tecnica per la formazione di immagini tomografiche ad ultrasuoni con caratteristiche interessanti per le applicazioni nei controlli non-distruttivi. Allo stato attuale esistono diverse tecniche che sono accettate come standard per la rivelazione e la misura di difetti all'interno di materiali come ad esempio le tecniche ad apertura sintetica [2.1]-[2.2]. Il concetto alla base dell'apertura sintetica è la possibilità di realizzare un trasduttore con dimensioni grandi in modo da poterlo focalizzare in tutti i punti della zona di campo vicino. Il processo di focalizzazione può essere realizzato sia in trasmissione con opportuni sistemi di eccitazione delle sonde ma nel caso più interessante per i controlli non distruttivi, si può focalizzare il sistema tramite opportune elaborazioni dei segnali ricevuti da un insieme di sonde standard. Il processo di focalizzazione in ricezione può essere utilizzato per formare una immagine ad alta risoluzione, ripetendo il calcolo per tutti i punti dello spazio di cui si vuole avere un'immagine. Questo processo viene chiamato genericamente processo di ricostruzione o di migrazione (termine proveniente dalla sismica). Un altro elemento importante è l'algoritmo di ricostruzione, il quale dipende dal tipo di propagazione assunta nell'esperimento.

Ecco come una prima classificazione di questi algoritmi può essere fatta considerando il tipo di sorgenti usate, la lunghezza d'onda e le dimensioni caratteristiche dei difetti. Comunque lo scopo finale di tutte queste tecniche è quello di fornire un'immagine con elevata risoluzione, di facile interpretazione e con un buon rapporto segnale rumore. Premessi questi punti fondamentali, il lavoro descritto in questo e nei successivi capitoli, riguarda un metodo innovativo per generare immagini tomografiche di difetti con forma geometrica non necessariamente semplice (per esempio cricche a fatica o regioni disomogenee dovute ad inclusioni).

Questa tecnica presenta alcuni aspetti innovativi e le sue caratteristiche derivano dalle seguenti assunzioni:

- 1) indagine basata sulla diffrazione per tempo di volo TOFD (Time-of-flight-Diffraction)
- 2) acquisizione con sonde separate che approssimano sorgenti/ricevitori puntiformi
- 3) acquisizione secondo angoli d'incidenza variabili cambiando la separazione delle sonde (tecnica Multi-offset).

L'applicazione della TOFD nei controlli non distruttivi fu introdotta circa quindici anni fa ed è attualmente usata con successo per ispezioni di routine dei metalli presso la Harwell Laboratory [2.3]-[2.7]. La tecnica TOFD fornisce informazioni sulla posizione, la forma e le dimensioni del difetto per mezzo dell'interpretazione dei segnali radiofrequenza ricevuti da un sistema mono sonda (tipo pulse-echo) o con coppia di sonde (tipo tandem o pitch-catch).

La tecnica proposta combina le caratteristiche della tecnica TOFD con la possibilità di ottenere immagini tomografiche ad alta risoluzione basate sui segnali a radiofrequenza. Inoltre l'immagine presentata ha il vantaggio di potere essere direttamente interpretata in quanto rappresenta una sezione dell'oggetto con dimensioni lineari consistenti con quelle reali e quindi più semplice della presentazione delle tracce ultrasoniche tipo B-scan.

Perciò potremmo chiamare questa tecnica come tomografia per diffrazione del tempo di volo o TOFDT (Time Of Flight Diffraction Tomography).

Le tecniche tomografiche ad ultrasuoni furono già sviluppate per l'analisi dei tessuti in campo biomedico. In questi casi l'inversione del campo si basava sull'equazione d'onda scalare con l'assunzione di deboli scatteratori. Inoltre combinando le misure secondo diversi angoli di vista dell'oggetto si è dimostrata la possibilità, almeno a livello teorico, di ottenere immagini quantitative ad alta risoluzione [2.8]-[2.11]. Tuttavia nel campo biomedico il successo delle tecniche tomografiche ad ultrasuoni, è stato limitato da difficoltà di carattere pratico come ad esempio il modo di accoppiare le sonde con il paziente. Fra queste tecniche la tomografia per diffrazione è quella che ha le migliori potenzialità per avere immagini ad alta risoluzione e le sue caratteristiche dipendono



dalla scelta della larghezza di banda dei trasduttori, la frequenza centrale, il numero di trasduttori [2.12]. Il prezzo che si deve pagare per queste migliori prestazioni è una maggiore complessità di calcolo nonché un set up sperimentale più complesso.

Nel campo dei controlli non distruttivi un sistema di immagini dovrebbe essere affidabile per la caratterizzazione delle inclusioni o per la misura delle cricche. I difetti interessanti in queste applicazioni sono di due tipi: scatteratori deboli di volume e difetti con superficie libera da sforzo (stress-free boundary). A questo scopo algoritmi di ricostruzione di immagini bidimensionali e tridimensionali sono stati investigati da diversi autori, come la SAFT (Synthetic Aperture Focussing Technique), FT-SAFT (Fourier Transform SAFT), sistemi olografici a banda larga o stretta, tomografia assiale per riflessione [2.13]-[2.19]. I metodi proposti per l'inversione del campo possono essere sviluppati sia nel dominio del tempo che della frequenza. Anche se quelli nel dominio della frequenza hanno il vantaggio di potere usare algoritmi di Fast Fourier Transform veloci non hanno ancora dimostrato una netta superiorità in termini di tempo di calcolo. Nel nostro caso si è preferito affrontare il problema nel dominio del tempo non solo perché il metodo fu originariamente applicato direttamente a segnali temporali, ma per la facilità di un costante riscontro con i segnali acquisiti con i vari esperimenti.

Sia nel campo della biomedica che in quello dei controlli non distruttivi esiste per questi metodi il problema della "proiezioni incomplete", ovvero la mancanza di informazioni relative ad certe direzioni di incidenza. Con l'ipotesi che la funzione da ricostruire sia una funzione analitica questo problema può essere risolto con lo sviluppo di un filtro inverso. Il metodo ad apertura sintetica presentato in questo lavoro è un compromesso tra un limitato numero di acquisizioni, una buona risoluzione spaziale ed un tempo di calcolo accettabile.

La tecnica TOFDT impiega in questa versione sorgenti e ricevitori puntiformi. Questo metodo si basa quindi sulla possibilità di insonificare in modo uniforme la zona investigata. Inoltre è particolarmente adatto nei casi in cui si manifesta il fenomeno della diffrazione a causa di difetti all'interno di zone che presentano anche una certa disomogeneità. Infatti la presenza di strati inclinati con un certo gradiente di impedenza causa la rifrazione e riflessione del fascio incidente limitando la possibilità di una misura accurata dei difetti. In questi casi si può pensare che questa tecnica fornisca immagini di migliore qualità rispetto alla tecnica pulse-echo. Anche il metodo di acquisizione su



un elevato numero di posizioni della coppia di sonde a differente distanza, aumenta il rapporto segnale rumore grazie all'operazione di media effettuata su ogni pixel dell'immagine. Questa caratteristica dovrebbe non solo aumentare la sensibilità del sistema ma anche renderlo più immune dal rumore di tipo speckle [2.20].

Al contrario delle applicazioni degli ultrasuoni in medicina, nel caso dei controlli non distruttivi su materiali solidi, la propagazione degli ultrasuoni è governata dalla teoria delle onde elastiche che permette la generazione di onde di compressione sia onde trasversali. Siccome la TOFDT è basata sull'informazione del tempo di volo in questo lavoro siamo interessati ai casi in cui la dimensione e la profondità dei difetti, sono tali che le onde longitudinali di compressione e quelle trasversali sono separabili nel tempo. La trattazione della conversione di modo per i metodi ad apertura sintetica è possibile ripetendo il processo di ricostruzione per ogni tipo di conversione considerata [2.21]-[2.22].

L'immagine è ricostruita nel dominio dello spazio dopo una linearizzazione dei segnali temporali con una somma coerente di funzioni ellissoidali isocrone, i cui fuochi stanno sulle posizioni correnti della sorgente e del ricevitore, mentre il tempo di volo è quello misurato per il segnale retrodiffuso.

Per quanto riguarda la misura dei difetti tramite TOFD, il lavoro è stato organizzato come segue.

In questo capitolo sono forniti i principi di base della ricostruzione con la tecnica TOFD ed uno sviluppo teorico per stimare la risoluzione laterale in forma analitica è presentato. Sempre nello stesso capitolo si è affrontato il caso più realistico dell'effetto della dimensione finita dei trasduttori e del campionamento spaziale dell'apertura.

Nel capitolo 3 è stata rimossa l'ipotesi di oggetti scatteratori puntiformi usata nel capitolo 2 ed i modelli teorici di difetti reali sono studiati. In questo capitolo sono riportati i risultati di simulazioni al calcolatore delle risposte ultrasoniche dei segnali diffratti da difetti per diversi intervalli di valori di  $ka$  (dove  $k$  è il vettore d'onda ed  $a$  la dimensione tipica dell'oggetto). In particolare sono studiati i modelli definiti da una versione modificata dell'approssimazione di Born [2.23] e quelli relativi alla teoria geometrica della diffrazione [2.24]-[2.25]. Come ulteriore sviluppo di questa tecnica, nel capitolo 4 è affrontato il problema del filtraggio inverso mirato all'aumento della risoluzione con filtri di Wiener e per aumentare la dinamica del sistema è stato



sviluppato un filtro di ampiezza.

Data l'importanza della realizzazione di sorgenti puntiformi per il tipo di tecnica proposta, nel capitolo 5 è affrontato il progetto di una sorgente efficiente di piccole dimensioni tramite un sistema di mascheratura di sonde ad immersione.

Infine nel capitolo 6 viene descritto il sistema sperimentale utilizzato per validare la teoria ed i risultati delle simulazioni, come anche le tecniche di ottimizzazione adottate per l'algoritmo di ricostruzione dell'immagine.

## 2.2 Principi della tomografia per diffrazione con segnali a banda larga: sviluppo teorico della risoluzione laterale del sistema ad apertura sintetica con il metodo delle sorgenti elementari

Gli algoritmi di ricostruzione dell'immagine per la tomografia per diffrazione erano stati studiati per applicazioni in medicina con misure in trasmissione [2.26], [2.11] e nel campo della sismica [2.27] da altri autori.

In particolare per le applicazioni ai controlli non distruttivi una tecnica basata sulla tomografia per diffrazione in ricezione è stata sviluppata. Questa tecnica basata sulla diffrazione degli impulsi da parte dei difetti risulta interessante poiché rappresenta una estensione della ben nota misura dei difetti con la diffrazione di segnali a banda larga per tempo di volo [2.28].

Quindi gran parte della strumentazione di front-end messa a punto per questi sistemi di ispezione può essere riutilizzata per realizzare una tomografia dell'oggetto da investigare.

Le potenzialità della tomografia per diffrazione a banda larga furono applicate per applicazioni in biomedica, per avere delle stime quantitative dei parametri acustici caratterizzanti i tessuti biologici.

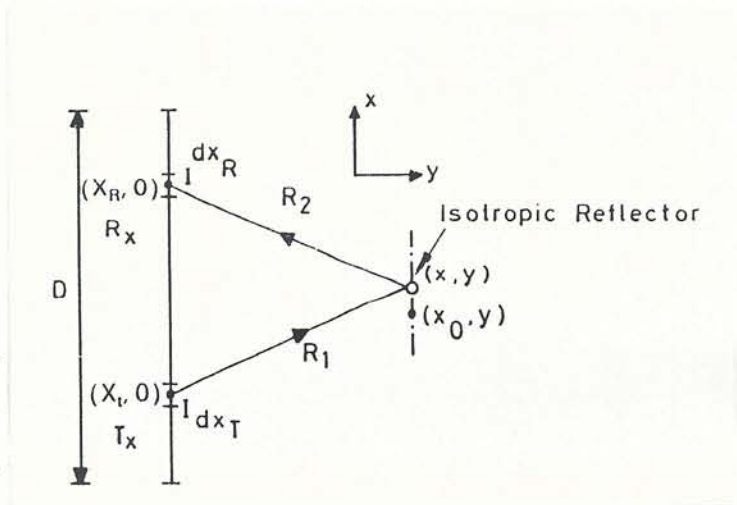


Figura 2.1. Definizione dei termini per il sistema di acquisizione dati ad apertura sintetica.

Le prove su oggetti puntiformi in trasmissione misero in evidenza le buone caratteristiche di questa tecnica in termini di dinamica e di risoluzione spaziale.

Data l'importanza della valutazione teorica della risoluzione ottenibile con questo metodo per la misura dei difetti in riflessione, è stata sviluppata una dimostrazione teorica basata sul principio delle sorgenti elementari che fornisce una soluzione analitica a questo problema.

In figura 2.1 è illustrato lo schema di acquisizione dei dati chiamato "complete data set" che è alla base del metodo. Per ogni posizione del trasmettitore sull'apertura con estensione totale  $D$ , i segnali retrodiffusi sono acquisiti con un ricevitore che esegue una scansione completa dell'apertura  $D$ . Il processo è ripetuto per tutte le posizioni del trasmettitore sull'apertura  $D$ . Il metodo di acquisizione è quello più generale per un sistema ad apertura sintetica in quanto sono considerate tutte le possibili posizioni dell'elemento trasmittente  $(X_t, 0)$  e di quello ricevente  $(X_r, 0)$ . Questo metodo è potente in quanto si investe l'oggetto secondo diverse inclinazioni ed analogamente si ricevono i segnali retrodiffusi da esso secondo diverse angolazioni. Date queste caratteristiche si intuisce come possa essere vantaggiosamente utilizzato per ottenere immagini di inomogeneità inserite all'interno di un materiale ospite.

Con l'ipotesi di apertura con estensione  $D$  molto maggiore della dimensione della zona di cui si vuole l'immagine tomografica ed effettuando due scansioni complete fra loro perpendicolari, il metodo sintetizza la rotazione di  $180^\circ$  intorno all'oggetto comunemente adottata nei sistemi di tomografia assiale computerizzata.

Come già accennato in questo lavoro è stata derivata una espressione della risoluzione assiale e laterale con alcune ipotesi semplificative.

Siano  $(X_r, 0)$  ed  $(X_t, 0)$  le posizioni del ricevitore e del trasmettitore rispettivamente. Per semplicità si assume un campionamento continuo dell'apertura e trasduttori elementari puntiformi. L'effetto del campionamento spaziale dell'apertura e della dimensione finita dei trasduttori verrà affrontato nel seguito di questo capitolo.

Siccome il sistema è basato sulla diffrazione per tempo di volo, il segnale a banda larga trasmesso da una sorgente elementare con dimensione  $dx_t$  ha la forma  $\text{Re}[s(t) * e^{j\omega t}]$ , dove  $s(t)$  è l'involuppo dell'impulso ed  $\omega$  la frequenza angolare. Il segnale retrodiffuso ( $du(t)$ ) da un riflettore puntiforme isotropo nella posizione  $(x, y)$  e ricevuto da un ricevitore elementare con dimensione  $dx_r$  è il seguente:



(2.1)

$$du(t, x_r, x_t) = \text{Re}[s(t - d(x_r, x_t, x, y)/v) * e^{j\omega(t - d(x_r, x_t, x, y)/v)}] * dx_r * dx_t$$

(2.2)

$$\text{dove: } d(x_r, x_t, x, y) = ((x_r - x)^2 + y^2)^{1/2} + ((x_t - x)^2 + y^2)^{1/2}$$

$v$  = velocità di propagazione degli ultrasuoni

È interessante notare che il fattore di ritardo temporale  $d(x_r, x_t, x, y)/v$  definisce una funzione isocrona che nel dominio dello spazio è una ellisse. L'ellisse ha i fuochi in  $(x_r, 0)$  e  $(x_t, 0)$ , e passa per la posizione  $(x, y)$  del riflettore puntiforme.

Inoltre assumendo un mezzo con attenuazione trascurabile e gli scatteratori distribuiti in una zona in campo lontano, l'attenuazione dovuta alla propagazione è data dal termine  $1/(R_1 * R_2)$ , dove  $R_1$  ed  $R_2$  in Fig.2.1 sono le distanze del riflettore isotropo dal trasmettitore e ricevitore rispettivamente. Essendo questa zona in campo lontano possiamo considerare in prima approssimazione questo termine costante.

Con queste assunzioni il processo di formazione dell'immagine consiste nella migrazione di una doppia infinità di segnali relativi alle coppie delle posizioni del ricevitore e trasmettitore sull'apertura  $D$ . Per giungere ad una espressione per la risoluzione laterale dell'algorithmo di ricostruzione consideriamo di focalizzare il sistema in un punto  $(x_0, y)$  alla stessa profondità del riflettore isotropo in  $(x, y)$ . Perciò possiamo introdurre una nuova variabile  $t'$  così definita:

(2.3)

$$t' = t + d(x_r, x_t, x_0, y_0)/v$$

Questa nuova variabile ci serve per calcolare la point spread function (PSF) del sistema tramite la seguente formula per l'inversione diretta tempo-spazio:

(2.4)

$$I(x_0, y) = \int_{-D/2}^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} du(t' + d(x_r, x_t, x_0, y)/v - d(x_r, x_t, x, y)/v)$$

L'assunzione di scatteratori in campo lontano ci permette di ritenere valida

l'approssimazione parassiale.

La formula di inversione (2.4) può essere riscritta nella seguente forma grazie all'approssimazione parassiale:

$$I(x_0, y) = \int_{-D/2}^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} du (t' - (x^2 - x_0^2)/(y^*v) + (x_r + x_t)^*(x - x_0)/(y^*v)) \quad (2.5)$$

Scegliendo il tempo  $t'$  uguale a  $(x^2 - x_0^2)/(y^*v)$ , l'integrale in (2.5) diventa una funzione solo di  $x_r$  e  $x_t$ .

$$I(x_0, y) = \int_{-D/2}^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} du ((x_r + x_t)^*(x - x_0)/(y^*v)) = \quad (2.6)$$

$$= \int_{-D/2}^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} \text{Re}[s((x_r + x_t)^*(x - x_0)/(y^*v)) * e^{j\omega(x_r + x_t)^*(x - x_0)/(y^*v)}] * dx_r * dx_t$$

Assumendo l'involuppo dell'impulso  $s(t)$  sufficientemente lungo possiamo sostituire in (2.6)  $s(t) \approx s_{\max} = \text{costante}$  :

$$I(x_0, y) = s_{\max} * \text{Re} \left[ \int_{-D/2}^{+D/2} \int_{-D/2}^{+D/2} e^{j\omega(x_r + x_t)^*(x - x_0)/(y^*v)} * dx_r * dx_t \right] \quad (2.7)$$

A questo punto l'integrale in (2.7) può essere risolto in modo esatto separando le variabili della funzione esponenziale in due funzioni indipendenti della variabile  $x_r$  e  $x_t$ , giungendo così all'espressione finale della PSF :

$$I(x_0, y) = s_{\max} * D * \text{sinc}^2(\pi * D * (x - x_0)/(y * \lambda)) \quad (2.8)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda definita come  $\lambda = 2 * \pi * v / \omega$

Dalla (2.8) possiamo calcolare la risoluzione laterale  $\delta_l$  basandoci sulla valutazione della PSF del riflettore puntiforme (criterio di Rayleigh), fornendo la seguente espressione:



(2.9)

$$\delta_1 \approx 0.73 y * \lambda / D$$

Per quanto riguarda la risoluzione assiale si riporta solo l'espressione finale. Questa espressione è nota per i sistemi ad apertura sintetica ed è derivata da altri autori [2.18]. L'espressione della risoluzione assiale a -3dB è indicata con  $\delta_a$  nella espressione qui di seguito :

$$\delta_a \approx 0.44 * v / \delta F \quad (2.10)$$

In analogia con altri sistemi di immagine a banda larga, come i sistemi olografici, essa dipende essenzialmente dalla larghezza di banda  $\delta F$  e dalla velocità degli ultrasuoni  $v$  del materiale ospite.

### 2.3 Effetti della discretizzazione del campionamento spaziale.

Teoricamente dall'espressioni della risoluzione laterale (2.9) ed assiale (2.10), si potrebbe pensare di realizzare valori di  $\delta_1$  circa uguali a  $\delta_a$ , scegliendo opportunamente l'estensione  $D$  per un insieme fissato di valori di  $\lambda, y, v, \delta F$ . Un'immagine tomografica con risoluzione spaziale uniforme è uno dei principali obiettivi dei sistemi di immagini ed in particolare per quelli tomografici. La tomografia per diffrazione a banda larga proposta sembra offrire questa caratteristica. Per esempio supponiamo di fissare un riflettore puntiforme alla profondità  $y=35$  mm, trasduttori con larghezza di banda  $\delta F = 2.5$  Mhz, ed un blocco di acciaio  $v=5900$  m/s con  $\lambda=1.18$  mm (  $5$  MHz = frequenza centrale della sonda). Per realizzare la condizione  $\delta_1 \approx \delta_a$  si deve scegliere  $D = 31.3$  mm.

In molte applicazioni reali questo valore non è realizzabile perché  $D$  diventa comparabile con la profondità del difetto  $y$ . Inoltre tenendo conto del limite teorico imposto dalla teoria del campionamento uguale a  $\lambda/4$  per l'apertura, questo significa che l'acquisizione di molte tracce ultrasoniche e conseguentemente un aumento del tempo di calcolo per la ricostruzione. Il limite di  $\lambda/4$  può essere spiegato per questo tipo particolare di acquisizione dati: la differenza di fase introdotta dal percorso avanti-indietro è raddoppiata e perciò abbiamo un passo di campionamento limite pari a  $\lambda/4$

invece che  $\lambda/2$  come nel caso di insonificazione con onda piana [2.9]. Con questo passo di campionamento possiamo calcolare il numero di posizioni sulle quali è campionata l'apertura  $D$  che deve essere  $\geq 4 \cdot D/\lambda = 107$ .

Per sistemi di controllo non distruttivo come le ispezioni di routine di grandi strutture metalliche, è utile avere un sistema di acquisizione e possibilmente di ricostruzione dell'immagine veloce per problemi di costo ed in alcuni casi di condizioni

operative avverse. Nel capitolo 6 vedremo che per l'algoritmo di ricostruzione proposto si può trovare un buon compromesso tra prestazioni e tempo di calcolo.

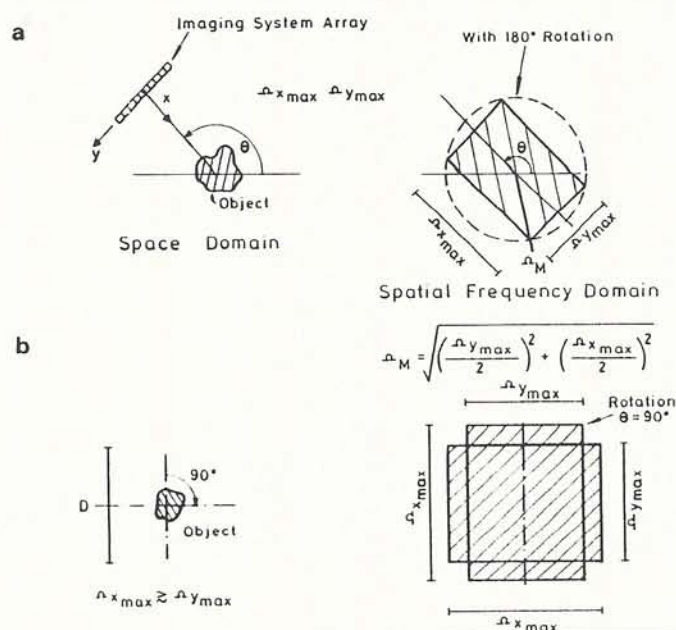
Inoltre la tomografia per diffrazione a banda larga mostra una risoluzione spaziale uniforme quando l'intero processo di acquisizione è ripetuto con una rotazione relativa di  $90^\circ$  fra oggetto e sistema di scansione.

Questa importante caratteristica può essere spiegata qualitativamente secondo lo schema in figura 2.2. Siano  $\omega_{x_{\max}}$  e  $\omega_{y_{\max}}$  i massimi valori delle frequenze spaziali della trasformata bidimensionale di Fourier dell'immagine creata con la tomografia per diffrazione a banda larga con una sola scansione lineare. La relazione che lega la frequenza spaziale alla risoluzione è la seguente:

(2.11)

$$\omega_{x_{\max}} = 2 \cdot \pi / \delta_a \quad \omega_{y_{\max}} = 2 \cdot \pi / \delta_l$$

In generale, le immagini tomografiche sono ottenute dopo un processo di composizione (compound) dello spettro bidimensionale delle immagini acquisite secondo



**Figura 2.2.** Risoluzione spaziale uniforme per il sistema TOFDT con rotazione dell'oggetto di  $90^\circ$  e relazioni con la risoluzione assiale e laterale. (a) Caso generale con tomografia per riflessione. (b) Tecnica TOFDT.



differenti orientazioni rispetto alla posizione dell'oggetto. Con una rotazione completa di  $180^\circ$  la somma degli spettri fornisce uno spettro con dominio circolare che significa risoluzione spaziale identica in tutte le direzioni.

In figura 2.2 la direzione della cortina lineare di trasduttori è indicata con l'angolo  $\theta$  rispetto ad una posizione di riferimento. Si noti la forma rettangolare dello spettro che sottolinea il problema di una minore risoluzione laterale rispetto a quella assiale.

Con la nostra tecnica ci si può avvicinare al caso ideale con una rotazione di  $180^\circ$  grazie alla buona risoluzione laterale ottenibile. Infatti sommando i due spettri bidimensionali perpendicolari tra loro si può ottenere una risoluzione spaziale quasi-uniforme partendo da una situazione in cui  $\delta_l$  è di poco minore a  $\delta_a$ . Il raggio del cerchio inscritto nella figura 2.2 in basso a destra fornisce la massima risoluzione in termini di frequenza spaziale che vale:

$$\omega_M = 0.5 ( \omega_{x_{\max}}^2 + \omega_{y_{\max}}^2 )^{0.5} \quad (2.12)$$

Tuttavia si deve considerare che in molti casi nelle ispezioni di routine non è praticabile la rotazione relativa di  $90^\circ$ , come ad esempio l'ispezione di grandi barre metalliche. In questi casi i benefici della rotazione perpendicolare sulla risoluzione totale sono persi.

Altri due fattori che influenzano la risoluzione spaziale del sistema proposto sono:

- la banda del segnale ultrasonico ed il tempo di campionamento,
- la dimensione finita dei trasduttori.

La discretizzazione del tempo che è legata alla banda del segnale ultrasonico influenza principalmente l'ampiezza dei lobi laterali della PSF del sistema. Basandosi sulla teoria esposta in un lavoro fondamentale su questo argomento [2.29], possiamo dire che nel nostro caso l'effetto sui lobi laterali della PSF è ridotto date le caratteristiche di larga banda del segnale trasmesso. Sarà mostrato nel seguente paragrafo che l'effetto preponderante sulle caratteristiche della PSF è dovuto alla dimensione finita dei trasduttori. I risultati ottenuti dalla teoria esposta nel paragrafo 2.2 dovranno essere rivisti alla luce di considerazioni di carattere sperimentale.

## 2.4 Aspetti teorico-sperimentali delle sorgenti e ricevitori con dimensione finita

L'altro fattore che limita la risoluzione spaziale del sistema per tomografia per diffrazione a banda larga è la dimensione finita del trasduttore. Fino ad ora abbiamo supposto di utilizzare sorgenti e ricevitori puntiformi che risultavano estremamente utili nella trattazione teorica anche se lontane dalla reale situazione sperimentale. Quando si impiegano trasduttori con dimensione finita si deve tenere conto della loro funzione di direttività. L'acquisizione di immagini tomografiche significa che solo la sezione trasversale dell'oggetto deve essere insonificata. Questo può avvenire solo impiegando trasduttori tipo a striscia sottile in cui la dimensione lungo l'apertura  $D$  è molto più piccola dell'altra, che generano un'approssimazione di un'onda cilindrica. Nel caso di trasduttori circolari con diametro molto minore di  $\lambda$  si approssima una sorgente di onda sferica nello spazio tridimensionale. La funzione direttività sul piano risulta  $\sin(x)/x$  per trasduttori a forma di striscia sottile e  $2J_1(x)/x$  ( $J_1$  Funzione di Bessel del primo ordine) per quelli circolari, dove  $x$  indica lo spostamento laterale.

L'acquisizione dei dati con il metodo con doppia scansione indipendente della sorgente e del ricevitore può essere fatto con trasduttori isotropi. Con questa ipotesi l'area investigata viene insonificata allo stesso modo da ogni posizione del trasmettitore ed in particolare anche dalle estremità dell'apertura  $D$ . In generale i segnali sono retrodiffusi dalla distribuzione di scatteratori in ogni direzione ed è quindi necessario acquisire i segnali in tutte le posizioni del ricevitore per non perdere nessun contributo informativo. Il ruolo della funzione direttività nella risoluzione del sistema come anche la dinamica dell'immagine può essere capito facendo riferimento alla figura 2.3a.

Supponiamo di avere il trasmettitore centrato sulla stessa posizione ( $x = x_t$  in figura 2.3a) del riflettore puntiforme ed isotropo (ovvero coefficiente di scattering = 1 in tutte le direzioni).

Definiamo gli angoli di incidenza del ricevitore e del trasmettitore rispettivamente (vedi figura 2.3b):

$$\begin{aligned} \theta_R(x_r) &= \tan^{-1} (|(x_r - x)| / y) \\ \theta_T(x_t) &= \tan^{-1} (|(x_t - x)| / y) \end{aligned} \tag{2.13}$$



Se il ricevitore con la sua funzione direttività  $D_{R_x}(\theta_R, \omega)$  fa una scansione dell'apertura  $D$ , il segnale ricevuto è pesato dalla funzione  $D_{R_x}(\theta_R, \omega)$ . L'effetto totale è equivalente a quello di una funzione peso applicata all'intera apertura anche se nel caso generale la direttività è una funzione complessa dipendente dalla frequenza. Quindi i lobi laterali della PSF sono ridotti a causa della finestra creata dalla direttività sull'apertura rettangolare  $D$  al costo di una diminuzione della risoluzione laterale. Infatti il peso introdotto dalla funzione direttività riduce effettivamente l'apertura  $D$  e quindi anche  $\delta_l$  come previsto dalla relazione (2.9). L'analisi degli effetti delle funzioni di apodizzazione nei sistemi ad apertura

sintetica per controlli non distruttivi, furono già considerati da Burch e Burton [2.15]. Questo effetto è rafforzato quando il trasmettitore è mosso lontano dalla posizione centrale in quanto si somma l'effetto della sua direttività  $D_{T_x}(\theta_T, \omega)$ , come illustrato in figura 2.3b.

Concludendo in condizioni sperimentali per ogni combinazione di posizioni  $x_t$  ed  $x_r$ , l'apertura  $D$  è pesata da una funzione di direttività totale  $D_{\text{tofdt}}$  data dal prodotto di  $D_{R_x}(\theta_R, \omega)$  e  $D_{T_x}(\theta_T, \omega)$  come riportato nella seguente relazione:

$$D_{\text{tofdt}}(x_t, x_r, \omega) = D_{R_x}(\theta_R(x_r), \omega) * D_{T_x}(\theta_T(x_t), \omega) \quad (2.14)$$

Per quantificare gli effetti della direttività dei trasduttori per una situazione reale si è considerato il seguente esempio. I grafici in figura 2.4 rappresentano la funzione  $D_{\text{tofdt}}$

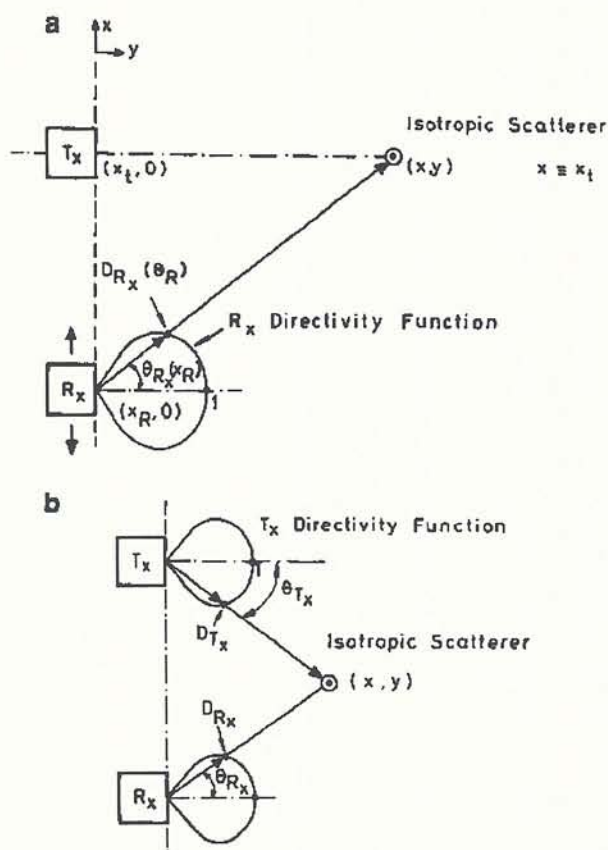
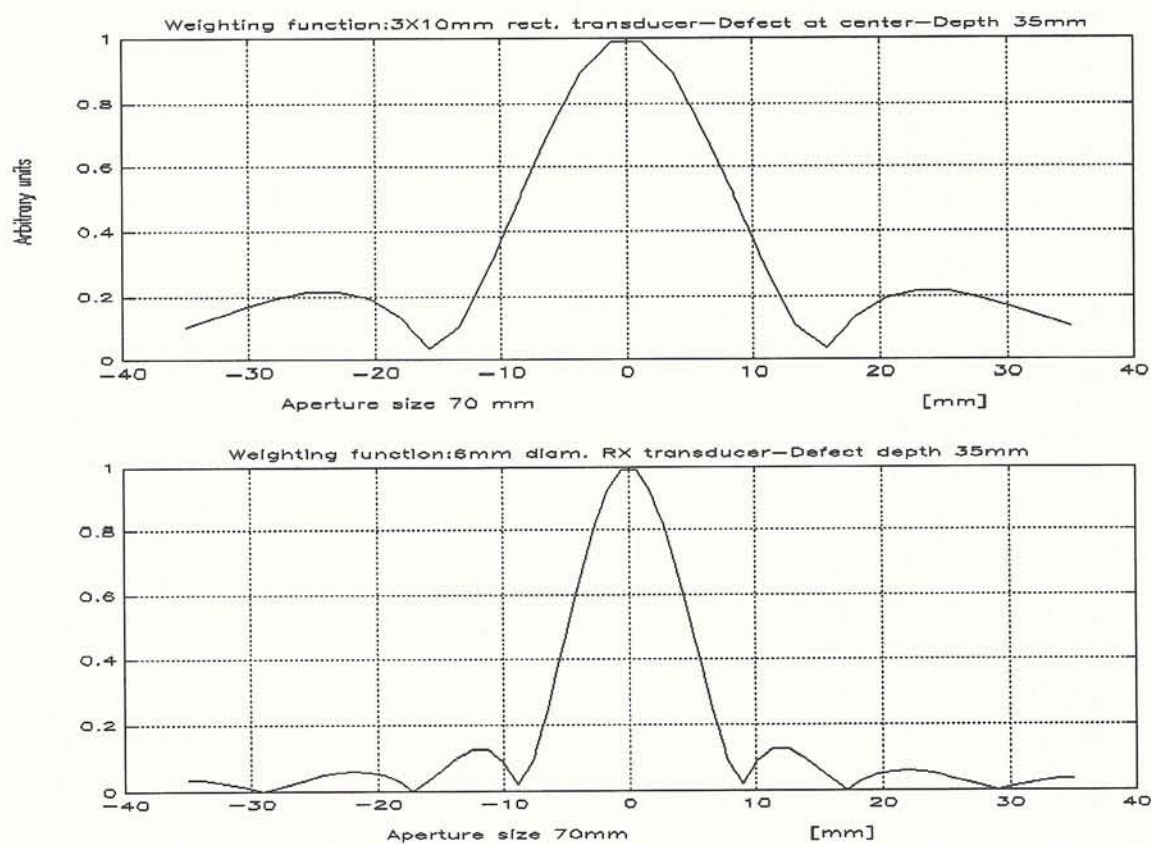


Figura 2.3. Effetti della funzione direttività' del trasmettitore e ricevitore. (a) trasmettitore centrato sul diffusore isotropo. (b) caso generale.

in funzione della sola coordinata  $x_R$  della posizione del ricevitore, con il trasmettitore fissato sulla posizione del riflettore puntiforme come in figura 2.3a.

I grafici si riferiscono ai seguenti dati:

trasduttore rettangolare 3x10 mm grafico (figura 2.4 in alto) e trasduttore circolare con



**Figura 2.4.** Funzioni peso dell'apertura sintetica con trasduttori a 5 MHz, apertura 70 mm. (In alto) Trasmittitore rettangolare 3x10 mm. (In basso) Trasmittitore circolare con 6 mm di diametro.

diametro 6 mm in basso,  $\lambda = 1.18$  mm alla frequenza di 5 MHz in acciaio,  $D = 70$  mm, centro in  $x_t = 0$ , profondità del riflettore puntiforme al centro = 35 mm.

Come si può osservare dai due grafici, l'apertura utile è più grande per il trasduttore rettangolare anche se con lobi laterali leggermente maggiori rispetto a quella del trasduttore circolare, con evidenti vantaggi sulla risoluzione laterale del sistema.



**Bibliografia**

- [2.1] Yoshihiko O., Hiroaki S., Toshimasa T., Mitsuo T., A new system for real-time synthetic aperture ultrasonic imaging, *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 35, n.6, (1988), pp. 828-838
- [2.2] Busse L.J., Three-dimensional imaging using a frequency domain synthetic aperture focusing technique, *IEEE Trans. on UFFC*, vol.39, n.2, (1992), pp.174-179
- [2.3] Silk M.G., Accurate crack depth measurements in welded assemblies, Eight World Conference on Non Destructive Testing, Cannes (France), 6-11 September (1976), paper 2816
- [2.4] Silk M.G., The transfer of ultrasonic energy in the geometry of the diffraction technique for crack sizing, U.K.A.E.A. Report A.E.R.E. R.8665, Harwell Laboratory 1977 and *Ultrasonics* 17(3), (1974), 113-121
- [2.5] Silk M.G., The fundamental accuracy of the ultrasonic time-of-flight testing techniques. Periodic inspection of Pressurized Components, Conference publication 1982-9, Institution of Mechanical Engineers, London, (1982), 125-133
- [2.6] Silk M.G., The use of diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects. *British Journal Non Destructive Testing* 26(4), (1984), 208-213
- [2.7] Charlesworth J.P., Temple J.A.G., *Engineering Applications of Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction*, Research Studies Press, John Wiley & Sons Inc., Taunton, England (1989)
- [2.8] Bennet S., Peterson D.K., Corl D., Kino G.S., A real-time synthetic aperture digital acoustic imaging system, *Acoustical Imaging*, Plenum Press, Vol.10, (1982), pp.669-692
- [2.9] Berkhout A.J., Ridder Y., V.D.Wall L.F., Acoustic imaging by wave field extrapolation, *Acoustical Imaging* vol.10, Plenum Press, (1982), pp.513-565
- [2.10] Hiller D., Ermert H., System analysis of ultrasound reflection mode computerized tomography, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol.SU-31 n.4, (1984), pp 240-250
- [2.11] Capineri L., Castellini G., Rocchi S., On the possibility to investigate carotid artery plaques with high resolution imaging system by diffraction of ultrasound,

- Report n. 910402, Department of Electronic Engineering, University of Florence, Florence, Italy
- [2.12] Pourjavid S., Tretiak O., Ultrasound Imaging through time-domain diffraction tomography, *IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* (1991), vol. 38, pp 74-85
  - [2.13] Ermert H., Shaefer J.O., Flaw detection and imaging by high-resolution synthetic pulse holography, *Acoustical Imaging*, Plenum Press, Vol.10, (1982), pp. 629-642
  - [2.14] Burch S.F., Comparison of SAFT and two-dimensional deconvolution methods for the improvement of resolution in ultrasonic B-scan images, *Ultrasonics* 25 (1987), pp.259-266
  - [2.15] Burch S.F., Burton J.T., Ultrasonic synthetic aperture focusing using planar pulse-echo transducers, *Ultrasonics* 22 (1984), pp.275-281
  - [2.16] Thomson R.N., Transverse and longitudinal resolution of synthetic aperture focusing technique , *Ultrasonics*, January (1984), pp. 9-15
  - [2.17] Meyer K., Marklein R., Langenberg K.J., Kreutter T., Three-dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique, *Ultrasonics* , Vol. 28, (1990), pp.241-255.
  - [2.18] Ermert H., Karg R., Multifrequency Acoustical Holography, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. 26 n.4, (1979), pp. 279-286.
  - [2.19] van Dijk G.M., Hunik R., Stelwagen U., Terpstra S., Vogel J., Ultrasonic imaging with zero-offset synthetic aperture focussing technique, *Proc. of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing*, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, Vol.1, (1989), pp.170-175
  - [2.20] Yu Li, Newhouse V.L., Shankar P.M., Speckle reduction in ultrasonic SAFT images through split spectrum processing, *Review of Progress in Quantitative NDE Conference*, Eds Thompson D.O. and Chimenti D.E., Plenum Press, New York (1986), pp.727-734
  - [2.21] Lorenz M., van der Wal L.F., Berkhout A.J., Improved imaging with multi-SAFT, *Ultrasonics Symposium Proceedings*, (1990), pp. 1123-1128
  - [2.22] Ramsey A.T., Burch S.F., Windsor C.G., The application of Hough Transforms to Ultrasonic NDT data, Report AERE-R 13801, Harwell Laboratory, Didcot, Oxon., OX11 0RA, UK, (1988)



- [2.23] Rose J.H., DeFacio B., The eikonal approximation in elastic wave scattering theory, *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 1, (1982), pp. 119-129
- [2.24] Temple J.A.G., European developments in theoretical modelling of NDE in pipework, *Int. Jou. Pres. Ves. & Piping*, 28, (1987), pp 227-267
- [2.25] Pao Y.H., Sachse W., Interpretation of time records and power spectra of scattered ultrasonic pulses in solids, *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.56, N.5, (1974), pp. 1478-1486
- [2.26] Capineri L., Castellini G., Masotti L., Rocchi S., Broadband tomography system, - *International School of Physical Acoustic - 3rd Course on Ultrasonic Signal Processing*, Erice, Italy, October 1988, Publisher World Scientific, (1988), pp 245-253
- [2.27] Emersoy, C., and Levy, B.C., (1986) Multidimensional Born Inversion with a wide-band plane wave source, 1986, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 74, N.3, 466-475
- [2.28] Silk M.G., The use of the diffraction based time-of-flight measurements to locate and size defects, *British Journ. Non-Destr. Test*, 26(4), (1984),pp. 208-213.
- [2.29] Kino G.S., *Acoustic waves: Devices, Imaging, and analog signal processing*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1987)