

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



**Analisi critica delle risposte ultrasonore di difetti naturali ed
artificiali in assili ferroviari**

Relatore: Ing. Michele Carboni

Tesi di Laurea di:

Matteo Giacobini

Matr. 707349

Anno Accademico 2009 - 2010

Indice Generale

1	Stato dell'arte	
1.1	Sviluppo dei controlli non distruttivi nella storia	1
1.2	Applicazione Damage Tolerance agli assili ferroviari	3
1.3	Ultrasuoni.....	8
2	Analisi ultrasonora di difetti artificiali: controlli di individuazione	
2.1	Descrizione della strumentazione	22
2.2	Fasi preliminari	24
2.2.1	Calibrazione	24
2.3	Descrizione dei tipi di controllo effettuati	26
2.4	Difetti artificiali 2° percorso	26
2.4.1	Dati acquisiti Gilardoni RDG 500.....	29
2.4.2	Dati acquisiti Harfang X-32	37
2.4.3	Confronto Gilardoni-Harfang	40
2.5	Difetti artificiali 1° percorso	42
2.5.1	Dati acquisiti Gilardoni RDG 500	43
2.5.2	Dati acquisiti Harfang X-32	46
2.6	Nuovi difetti artificiali	48
2.6.1	Dati acquisiti Gilardoni RDG 500	49
2.6.2	Dati acquisiti Harfang X-32	53
2.7	Difetti artificiali realizzati su assile criccato	55
3	Analisi ultrasonora di cricche naturali di fatica: controlli di individuazione	
3.1	Prova di propagazione full-scale	61
3.1.1	Assile 014	63
3.1.1.1	Risultati Gilardoni RDG 500.....	70
3.1.1.2	Risultati Harfang X-32	73
3.1.2	Assile 019.....	76
3.1.2.1	Risultati Gilardoni RDG 500	82
3.1.3	Assile 020	85
3.1.3.1	Risultati Gilardoni RDG 500	87
3.2	Analisi cricche naturali di fatica-fretting (Lucchini)	89
3.2.1	Borosonda	90
3.2.2	Gilardoni RDG 500 analisi in 2° Percorso	92
4	Analisi ultrasonora di difetti: controlli di dimensionamento	
4.1	Configurazioni adottate	96

4.2	Risultati difetti artificiali	100
4.2.1	RDG 500 sonda ATM45-4 larghezza e dimensione..... caratteristica con metodo 6 dB	100
4.2.2	RDG 500 sonda ATM70-4 dimensione caratteristica con metodo diffrazione.....	105
4.2.3	Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 45°	106
4.2.4	Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 74°	108
4.3	Risultati difetti naturali cricche di fatica	110
4.3.1	RDG 500 sonda ATM45-4 metodo 6 dB larghezza e profondità	110
4.3.2	RDG 500 sonda ATM70-4 metodo diffrazione profondità.....	111
4.3.3	Harfang X-32 sonda phased array metodo diffrazione a 45° profondità	112
4.3.4	Harfang X-32 sonda phased array metodo diffrazione a 74° profondità	112
5	Simulazione numerica	
5.1	Descrizione della modellazione adottata	115
5.2	Defect response in primo percorso dei difetti artificiali	124
5.2.1	Riultati Gilardoni RDG 500 e sonda ATM45-4	126
5.2.2	Riultati Harfang X-32 e sonda phased array	131
6	Conclusioni	138
	Bibliografia	143

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 Sviluppo dei controlli non distruttivi nella storia

Le prove non distruttive sono il complesso di esami condotti impiegando metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di anche minimi campioni della struttura in esame. Da qui, la definizione di "non distruttive". I risultati delle indagini condotte applicando questi metodi, sono alla base della valutazione della qualità di un prodotto, dell'esame dell'integrità strutturale di un componente, per la diagnosi e la ricerca delle cause di malfunzionamento di macchinari od impianti. In conclusione I controlli non distruttivi sono utilizzati per stabilire l'affidabilità di un prodotto dal punto di vista della sua integrità fisica. Con essi si possono individuare le discontinuità, che per tipo, dimensione e orientamento possono comportare una situazione di pericolo durante l'impiego del pezzo. Il compito pertanto dei C.N.D. è quello di segnalare la presenza di discontinuità nei pezzi esaminati, identificandone anche il tipo.

E' importante osservare che i vari metodi di controllo non distruttivo, pur avendo in comune la caratteristica di dare informazioni circa l'integrità dei materiali, sono basati su principi fisici differenti e di conseguenza risultano tra loro complementari. Per operare quindi una scelta corretta delle tecniche di controllo non distruttivo da applicare ad un determinato prodotto e' necessario considerare diversi fattori:

- a) da un lato, le proprietà fisiche (ferromagnetismo, conducibilità elettrica, ecc.,) e lo stato del materiale (forgiato, laminato, saldato, ecc.);
- b) la forma, le dimensioni e il grado di finitura superficiale del pezzo in esame;
- c) il tipo, la posizione e l'entità dei difetti da rilevare.

Si deve da ultimo tenere presente che per effettuare dei controlli non distruttivi in grado di fornire risultati attendibili e' indispensabile operare con strumenti idonei, la cui efficienza sia costantemente vagliata in base ad opportune procedure di calibrazione atte a valutarne le caratteristiche funzionali. Le principali Prove non Distruttive attualmente impiegate sono le seguenti: liquidi penetranti, magnetoscopia, ultrasuoni, radiografia, correnti indotte, emissione acustica.

Si chiamano controlli non distruttivi in quanto non modificano, nemmeno su scala microscopica, le caratteristiche fisico-chimiche e le proprietà del prodotto in esame. I mezzi utilizzati per un C.N.D. costituiscono un sistema di controllo composto da due componenti:

1) L'elemento penetrante (radiazione penetrante per raggi x e gamma, fascio d'onde ultrasoniche per gli ultrasuoni, campo magnetico per le polveri magnetiche, fluido per i liquidi penetranti, corrente elettrica per le correnti indotte.).

2) L'elemento rivelatore (pellicole radiografiche per i raggi x o gamma, segnale su un tubo a raggi catodici per gli ultrasuoni, polveri magnetiche per il metodo con polveri magnetiche, il rivelatore per i liquidi penetranti, il segnale su un tubo a raggi catodici o l'indicazione di uno strumento per le correnti indotte) [1,2].

Lo sviluppo delle tecniche C.N.D. è dovuto essenzialmente ad un fattore economico (sicurezza e garanzia di qualità sono "sinonimi" di economia). I C.N.D. si sono imposti a tal punto nell'industria che, attualmente i progettisti, nel disegnare i particolari di un prodotto, si basano sul sistema di controllo non distruttivo che, durante l'esercizio, dovrà essere attuato. È chiaro che, potendo verificare nel tempo la "salute" di un impianto, sia esso nucleare, aeronautico, industriale, ecc., le strutture possono essere calcolate con fattori di sicurezza più realistici ed economicamente più vantaggiosi. I C.N.D. permettono, infatti, di scoprire eventuali difetti nelle strutture durante le normali operazioni di manutenzione ed evitare i fermi macchina improvvisi "per avaria". In molti casi le strutture subiscono sollecitazioni molto gravose e la necessità che queste siano anche leggere, fa sì che la struttura stessa non sia progettata per resistere indefinitamente a queste sollecitazioni; si ammette, anzi, che la struttura stessa sia destinata ad avere una vita utile limitata nel tempo. Di conseguenza, l'esigenza di metodi C.N.D., che siano in grado di rilevare ogni possibile indizio di avaria e di seguirla nel suo progredire, si è fatta sempre più grande e, nello stesso tempo, la maggiore affidabilità dei C.N.D. ha permesso di cambiare i criteri di progettazione dal "SAFE-LIFE" al "DAMAGE-TOLERANCE".

Il primo criterio, il "**SAFE-LIFE**", presupponeva che la struttura fosse in grado di impedire che il danno si verificasse prima che la sua utilizzazione avesse raggiunto un prefissato periodo di tempo. L'adozione di questo criterio comportava vantaggi nelle operazioni di manutenzione e nella determinazione del livello delle scorte. Gli svantaggi erano dovuti al fatto che i componenti dovevano essere sostituiti nonostante la loro perfetta efficienza e che il livello delle scorte era ugualmente notevole; inoltre, la probabilità di avere avarie infantili era alta per il gran numero di sostituzioni effettuate. Questo principio è ancora usato nei particolari in cui non è possibile individuare il danno prima che la resistenza residua del pezzo stesso sia ridotta sotto i limiti accettabili.

Un altro criterio, che tuttora è applicato sugli aeromobili civili e militari, è il "**FAIL-SAFE**". Secondo questo principio si ammette la possibilità dell'inizio del danno per fatica, ma la struttura è progettata in modo da contenere il danno, grazie alla sua resistenza residua, nei limiti di sicurezza, sino alla sua scoperta visiva durante le operazioni di manutenzione. Con questa filosofia, quindi, una struttura lavora in presenza di un danno finché questo non raggiunge dimensioni

tali da essere visto dall'operatore. Il vantaggio principale è quello dello sfruttamento più esteso dei componenti, contro un aumento di peso dovuto alla duplicazione della struttura (ridondanza) e, di conseguenza, ad un incremento dei costi.

Al criterio del “**DAMAGE-TOLERANCE**” si è arrivati con il progredire della conoscenza sul comportamento dei materiali sotto sollecitazione. Conoscendo le leggi della meccanica della frattura, si può stabilire, con sufficiente approssimazione, il tempo occorrente perché l'avaria si sviluppi completamente e il minimo intervallo di tempo per eseguire le ispezioni periodiche, mediante naturalmente opportuni C.N.D., i quali assicurano un determinato rilevamento del difetto minimo. Con questa filosofia, infatti, oltre ad avere una struttura con una elevata resistenza residua, si deve avere la possibilità di identificare il danno prima che la resistenza sia ridotta al di sotto dei limiti esistenti [3].

1.2 Applicazione Damage Tolerance agli assili ferroviari

Nelle strutture sono sempre inevitabilmente presenti zone di concentrazione di sforzo dovute, tipicamente, a cambiamenti di forma geometrica, ad applicazione di carichi o a contatti tra diverse parti. Inoltre è spesso difficile evitare la presenza di irregolarità superficiali o cavità di ritiro nei componenti, dovute ai processi di fabbricazione, ed eventuali difetti dovuti a danneggiamenti in esercizio, come ad esempio corrosione o incisioni dovute all'impatto di oggetti estranei. Nel caso in cui la struttura sia sottoposta a carichi variabili nel tempo, da queste zone possono nucleare, e successivamente propagare, cricche di fatica che costituiscono un pericolo per l'integrità della stessa struttura. In molti casi la formazione e propagazione di cricche di fatica non può essere evitata e la loro presenza viene tollerata in fase di progettazione. Per far ciò è però indispensabile riuscire a determinare, tramite le metodologie della meccanica della frattura, i possibili punti di innesco di cricche di fatica e i tempi di propagazione necessari al raggiungimento della propagazione instabile. Questo permette di stabilire i tempi di ispezione del componente in modo tale da poter intervenire con la riparazione o con la sostituzione della parte danneggiata di struttura quando necessario. L'approccio appena descritto costituisce la cosiddetta progettazione *damage tolerant*. L'origine di questa filosofia progettuale risale alla prima metà degli anni '70 quando, in seguito ad eventi catastrofici che riguardarono in particolar modo velivoli militari, venne effettuata una revisione critica della metodologia progettuale comunemente utilizzata. Fino ad allora la progettazione delle strutture, in particolar modo aeronautiche, era basata sull'approccio *safe-life*: la struttura veniva dimensionata in modo tale che in tutto l'arco della sua vita utile non si sviluppassero cricche

di fatica. L'incertezza che caratterizza i dati di fatica dei materiali, sommata alle limitazioni che caratterizzano le leggi che permettono di stimare la vita a fatica, spesso di natura empirica, obbligava i progettisti all'adozione di coefficienti di sicurezza elevati. Questo contrastava però con la tendenza di realizzare velivoli sempre più leggeri e dalle prestazioni più spinte. Inoltre, come già ricordato, gli alti coefficienti di sicurezza utilizzati non mettevano al riparo da cedimenti prematuri. Poiché dall'analisi di questi cedimenti risultò evidente che la causa principale era la formazione e la propagazione a fatica di cricche in punti particolarmente sollecitati o in prossimità di difetti della struttura, si rese necessaria la definizione della progettazione *damage tolerant*. Oggi l'approccio *safe-life*, anche se reso più raffinato dalle metodologie di tipo *defect tolerant*, viene adottato limitatamente a quelle parti di struttura a cui non è possibile accedere facilmente per le ispezioni periodiche [4].

La crescente domanda di affidabilità per i componenti ferroviari (nel nostro caso di assili), specialmente considerando le applicazioni ad alta velocità, ha portato ad una nuova definizione di coefficiente di sicurezza determinabile mediante l'approccio "defect tolerant" e la stima di intervalli di ispezione "safe life" in funzione delle caratteristiche del materiale, dei modelli di propagazione di cricche e delle ispezione CND i quali risultano essere fondamentali per la sicurezza.

La stima di vita a fatica degli assili ferroviari è di grande importanza per l'industria ferroviaria, in quanto un loro eventuale cedimento può dare origine a gravi conseguenze, l'Agenzia nazionale per la sicurezza ferroviaria ha rilevato in Italia quattro «svii» causati dalla rottura di un assile in dieci anni: il 18 gennaio 2004 a Fidenza una macchina operatrice, il 26 marzo 2004 ad Albate Camerlata in Lombardia la motrice e due vagoni passeggeri, il 26 marzo 2008 (4 anni esatti più tardi) a Castello una carrozza passeggeri e il 29 giugno 2009 a Viareggio (fig. 1.1) cinque ferrocisterne che costò la vita a 24 persone.



Fig. 1.1 Incidente ferroviario Viareggio 2009

Le posizioni tipiche per i cedimenti sono i calettamenti forzati di ruote, ruote dentate e dischi freno o il corpo assile in prossimità degli intagli. Detti cedimenti si presentano, in tutti i casi, in termini di rotture per fatica (in fig.1.2 la sezione dell'assile spezzatosi nel disastro di Viareggio) i cui inneschi possono essere dovuti a diverse cause: ad esempio, per il corpo assile, la presenza di corrosione estesa o eventuali danneggiamenti dovuti agli impatti del ballast.



Fig. 1.2 sezione di rottura dell'assile, causa del disastro di Viareggio

La progettazione di assili ferroviari è regolata da raccomandazioni tecniche essenzialmente basate sull'utilizzo di acciai dolci e sulla definizione del massimo sforzo ammissibile a fatica per una data combinazione di carichi agenti sugli assili stessi. Oltre a questo approccio classico, si osserva una richiesta crescente di valutazione affidabilistica degli assili, specialmente considerando gli intervalli di ispezione "safe life" e le applicazioni dell'alta velocità, dove assili cavi e acciai ad alta resistenza possono venire impiegati (ad esempio il Pendolino o l'ICE) ed è proprio l'uso di questi materiali ad alta resistenza con relativa resistenza alla frattura fragile bassa che introduce l'ulteriore problema della propagazione rapida delle cricche con la conseguente diminuzione della resistenza residua. Operazioni di carattere economico richiedono che le strutture possano operare in sicurezza per tutto il periodo di servizio per il quale sono stati progettati, ma a causa di incertezze in fase di determinazione dei carichi realmente agenti e di determinazione degli sforzi si deve prevedere l'insorgere di cricche prima della fine della vita utile del componente o addirittura appena messi in esercizio. La sicurezza richiede in fase di progettazione che il componente resista a carichi di entità apprezzabile sotto la presenza di cricche o parti danneggiate, inoltre il difetto o deve essere individuato prima che raggiunga una dimensione tale da essere pericolosa oppure che non raggiunga

mai tal dimensione durante la vita utile. È chiaro che queste considerazioni non sono sufficienti per ovviare al problema ma sono necessarie delle precauzioni. Queste precauzioni consistono in approfondite e tempestive ispezioni di controllo delle cricche. Se la richiesta è quella di non far sviluppare un difetto iniziale fino ad una dimensione pericolosa, le dimensioni del difetto iniziale non devono superare un certo limite quindi l'ispezione deve avvenire prima della messa in esercizio. Se la cricca, una volta sviluppata, può crescere senza diventar pericolosa con il passare del tempo le ispezioni invece dovranno essere periodiche.

Nel nostro specifico caso degli assili il danno che interviene più di frequente consiste nella comparsa di cricche di fatica abbinate a fenomeni di corrosione e impatti, di seguito si descrive uno dei vari metodi applicati per raggiungere la "damage tolerance". In figura 1.3 si mostra il caso di una struttura realizzata con un materiale avente basso rapporto di propagazione e alta resistenza residua. Dopo un certo periodo di tempo, se già non ne esistono, può generarsi una cricca (punto O del grafico di figura 1.3) la quale è talmente piccola che non può essere individuata con nessuna delle tecniche conosciute, dopo un certo periodo di tempo (fig. 1.3 punto A) essa raggiunge una dimensione tale da esser rilevata.

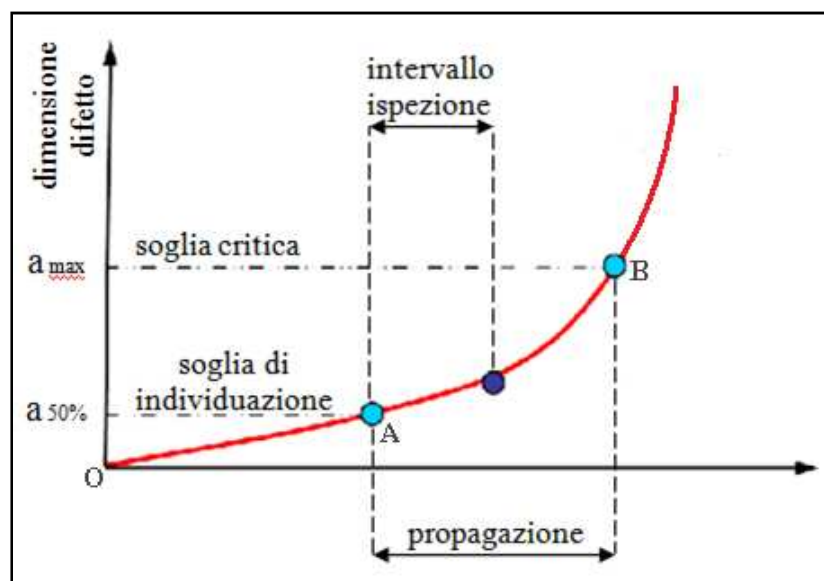


Fig. 1.3 curva di propagazione

Mentre la cricca aumenta di dimensioni la resistenza residua diminuisce gradualmente fino a scendere sotto il livello di resistenza "fail-safe" (fig. 1.4 punto B), il tempo che intercorre tra il punto A e B è disponibile per rilevare le

cricche. Per esser sicuri di non tralasciare nessun possibile difetto è opportuno durante questo periodo eseguire più di una ispezione.

Sebbene le cricche formatesi possano raggiungere una notevole lunghezza al termine di questo periodo, rimangono piccole per la maggior parte del tempo fino a quando non aumenta considerevolmente il rapporto di propagazione (ovvero quando la cricca ha già raggiunto una certa dimensione) questo significa che le relative cricche di piccola dimensione possono essere facilmente individuate sempre se la banda di tolleranza della lunghezza di cricca è abbastanza larga (tratto A-B di fig. 1.4) inoltre questo implica anche che un piccolo aumento della zona di tolleranza sia insignificante finchè la fase finale di propagazione della cricca risulta interessare una piccola porzione di tempo [5].

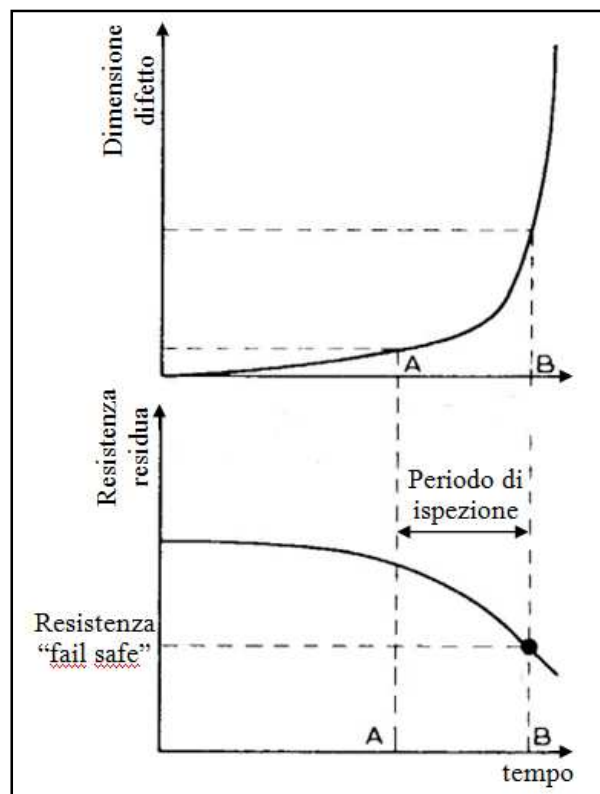


Fig. 1.4 propagazione e resistenza residua

In particolare, la vita a fatica di degli assili ferroviari supera spesso i 30 anni e, durante questo periodo, essi vengono regolarmente ispezionati mediante metodi CND. L'intervallo di ispezione viene definito come la distanza che può essere

percorsa in sicurezza tra due ispezioni CND successive. Questo intervallo è funzione di:

- la minima dimensione osservabile di cricca o difetto ($a_{50\%}$);
- la curva di propagazione (da/dN);
- il fattore di intensificazione degli sforzi critico a rottura (KIC).

Nell'ottica di ridurre il costo totale della sala ferroviaria, è quindi necessaria un'ottimizzazione degli intervalli d'ispezione degli assili. Per allungare gli intervalli di ispezione è necessario in primo luogo sviluppare materiali ad alta tenacità, il che corrisponde ad una a_{max} più alta, e maggiore resistenza alla propagazione di cricche, il che corrisponde ad una velocità di propagazione limitata dopodiché ottimizzare gli algoritmi per la previsione della propagazione a carichi variabili e dotarli della corretta descrizione delle geometrie in gioco e infine migliorare la rilevabilità di cricche o difetti di dimensioni ridotte ottenendo così la riduzione di $a_{50\%}$ [6].

1.3 Ultrasuoni

L'ispezione mediante ultrasuoni è un metodo non distruttivo in cui onde sonore ad alta frequenza sono introdotte nel materiale da esaminare, allo scopo di evidenziare difetti superficiali o interni, misurare lo spessore dei materiali, misurare la distanza e la dimensione delle difettosità.

La tecnica si basa essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di un'onda acustica nel materiale.

Gli ultrasuoni sono onde elastiche vibrazionali con frequenza compresa tra 1 e 10 MHz (per certe applicazioni il campo si può estendere dai 20 KHz fino ad oltre 200 MHz). Come per tutti i fenomeni ondulatori, è possibile definire per le onde sonore una lunghezza d'onda λ , un periodo T e una frequenza f , grandezze che sono legate fra loro dalle relazioni qui riportate (eq.1.1), nelle quali c rappresenta la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato (fig. 1.5).

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = cT \quad (1.1)$$

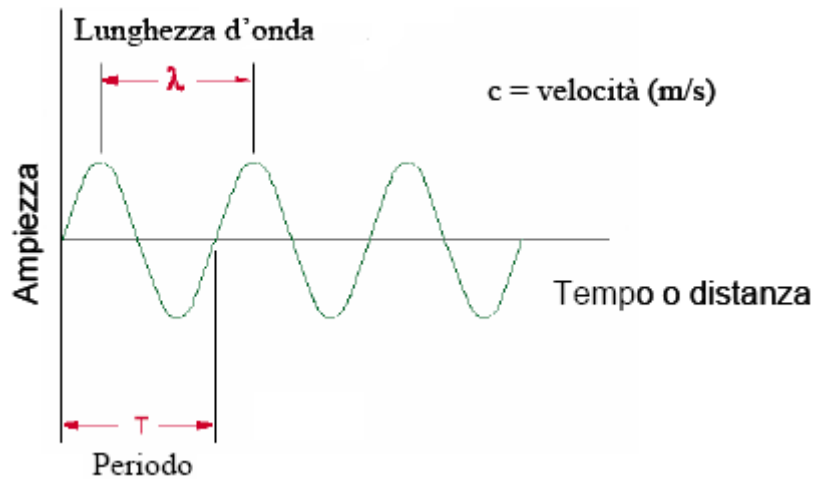


Fig. 1.5 caratteristiche fenomeni ondulatori

Tuttavia, a differenza della luce, le onde acustiche necessitano per la loro propagazione, di un mezzo elastico nel quale viaggiare. Ciò spiega perché nel vuoto non si propaga alcun suono. La propagazione delle onde acustiche può avvenire nei materiali secondo differenti modalità: Si parla di onde longitudinali quando l'oscillazione delle particelle elementari di cui si compone il materiale avviene parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda stessa (fig. 1.6).

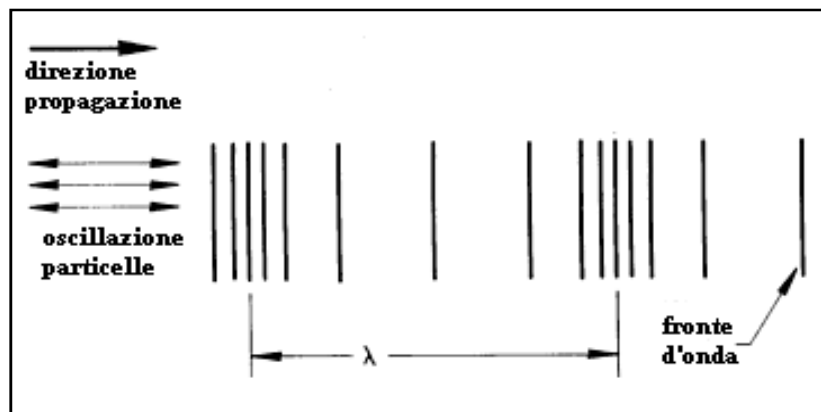


Fig. 1.6 schema onde longitudinali

Si definiscono onde trasversali quelle per le quali il fronte d'onda si muove ortogonalmente rispetto alla direzione del movimento delle particelle eccitate (fig. 1.7).

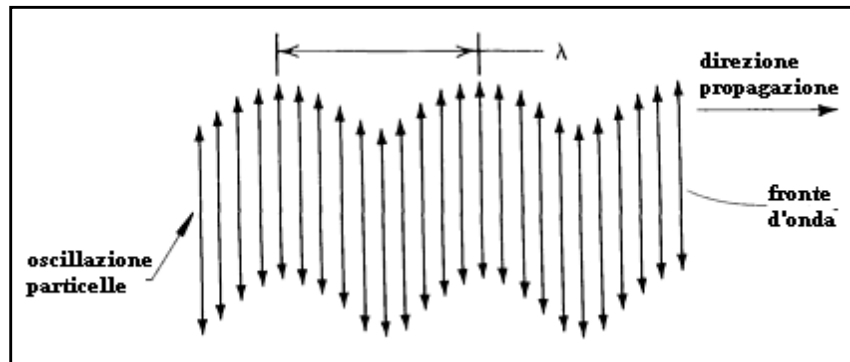


Fig. 1.7 schema onde trasversali

Le onde sonore (indipendentemente dalla loro frequenza) si propagano nei materiali sotto l'influenza di una pressione locale P definita "pressione sonora" che rappresenta, in sostanza, la sovrappressione a cui sono sottoposti gli atomi e molecole rispetto alla pressione standard atmosferica. Poiché atomi e molecole sono legati tra loro in modo elastico, tale sovrappressione si propaga lungo tutto il corpo e, se si indica con Q la velocità di spostamento delle particelle, si definisce l'impedenza acustica specifica del mezzo Z mediante la relazione (eq. 1.2):

$$Z = \frac{P}{Q} = \frac{\text{Pressione acustica}}{\text{Velocità di spostamento}} \quad (1.2)$$

In pratica, l'impedenza acustica caratterizza il comportamento del suono nei confronti di un dato materiale ed è stato dimostrato, a tale proposito, che essa è legata alle proprietà fisiche del materiale ρ (densità) e velocità di propagazione (V) mediante la seguente espressione (eq. 1.3)

$$Z = \rho V \quad (1.3)$$

Nella figura sottostante (fig. 1.8) è illustrata, in modo semplificato, la riflessione di un'onda ultrasonica incidente sulla superficie di separazione tra due mezzi aventi differente impedenza acustica: l'onda incidente e quella riflessa sono inclinate dello stesso angolo α_1 , che è in generale diverso dall'angolo α_2 secondo il quale si propaga l'onda trasmessa. Gli angoli α_1 e α_2 sono espressi dalla legge di Snell (eq. 1.4)

$$\frac{\text{sen} \alpha_1}{\text{sen} \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.4)$$

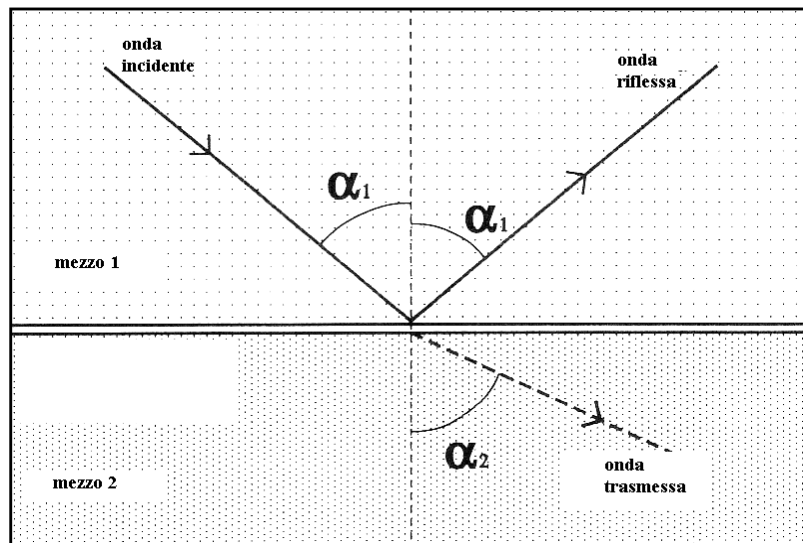


Fig. 1.8 riflessione e trasmissione di un' onda

Quando un'onda ultrasonica incide sulla superficie di separazione tra due mezzi una componente dell'onda longitudinale è convertita in un'onda trasversale riflessa nella regione del mezzo 1 ed in un'onda trasversale trasmessa nel mezzo 2. Gli angoli β_1 e β_2 secondo i quali tali componenti si propagano sono ancora una volta governati dalla legge di Snell a patto che le velocità considerate non siano più quelle relative alle onde longitudinali ma quelle proprie delle onde trasversali. Poiché le onde longitudinali viaggiano più velocemente delle trasversali (il rapporto è circa 2:1), gli angoli di riflessione e trasmissione β sono in generale minori di quelli α , come mostrato in figura (fig. 1.9).

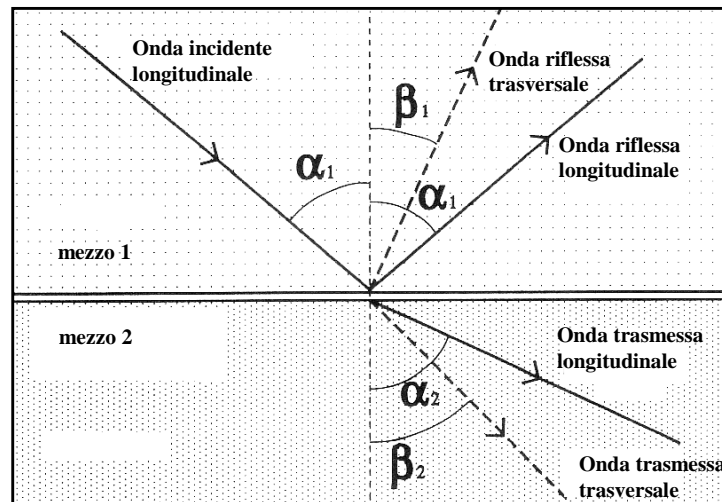


Fig. 1.9

Il controllo mediante ultrasuoni si basa essenzialmente sull'analisi delle variazioni delle caratteristiche delle onde riflesse e trasmesse quando il fascio incontra una discontinuità. La relazione fondamentale che governa la riflessione di un'onda ultrasonica che incide sulla superficie di separazione tra due mezzi di impedenza acustica diversa Z_1 e Z_2 è stata formulata nel diciannovesimo secolo da Poisson e matematicamente si esprime nella seguente forma (eq. 1.5):

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (1.5)$$

analoga relazione può essere scritta per ciò che riguarda il coefficiente di trasmissione T (eq. 1.6).

$$T = \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (1.6)$$

È interessante osservare che l'impedenza acustica è molto bassa nei gas (circa quattro ordini di grandezza minore rispetto a quella dei solidi) e ciò comporta valori del coefficiente di riflessione molto elevati alla superficie di separazione solido-gas (per esempio acciaio-aria, caso frequente nella pratica). In sintesi ciò si traduce nell'impossibilità di far propagare le onde ultrasoniche nell'aria dopo che queste hanno attraversato un materiale solido e questo spiega anche la necessità di interporre un opportuno strato di una sostanza solida, liquida o viscosa tra il trasduttore ed il pezzo da testare per poter eseguire il controllo in modo efficace.

Il fascio ultrasonico generato da un trasduttore, come si vedrà meglio in seguito, è divergente e ciò comporta una progressiva riduzione del contenuto energetico degli ultrasuoni, nonché un aumento delle dimensioni della zona illuminata. Inoltre, durante l'attraversamento del materiale, le onde ultrasoniche sono soggette a fenomeni di attenuazione provocati essenzialmente da assorbimento e scattering che agiscono in maniera dissipativa. In generale, la riduzione di intensità per un percorso x in un dato materiale può essere espressa con la relazione (eq. 1.7):

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.7)$$

A sua volta, il coefficiente di assorbimento (μ) può essere idealmente scisso nella somma di due contributi (eq. 1.8): uno legato all'assorbimento "reale", (funzione della frequenza dell'onda incidente e frutto della dissipazione energetica che si genera in forza dell'attrito molecolare) e uno derivante dallo

scattering, che è funzione essenzialmente della dimensione delle particelle di cui si compone il mezzo attraversato.

$$\mu = \mu_{\tau} + \mu_s \quad (1.8)$$

La generazione e la rilevazione delle onde ultrasonore è effettuata per mezzo di un elemento trasduttore contenuto all'interno della cosiddetta sonda (fig. 1.10a,b) denominato cristallo piezoelettrico. La piezoelettricità è una proprietà caratteristica di alcuni cristalli naturali e di alcuni materiali costruiti artificialmente. Come dice il nome stesso, un cristallo piezoelettrico è in grado di sviluppare una carica elettrica quando sottoposto a deformazione. Al contrario, quando il cristallo viene sottoposto ad un campo elettrico, si deforma. I materiali più comunemente utilizzati nelle sonde per ultrasuoni sono il quarzo, il solfato di litio, alcuni ceramici polarizzati, tipo il bario titanato, il piombo zirconato titanato, meta-niobato di piombo, ecc.

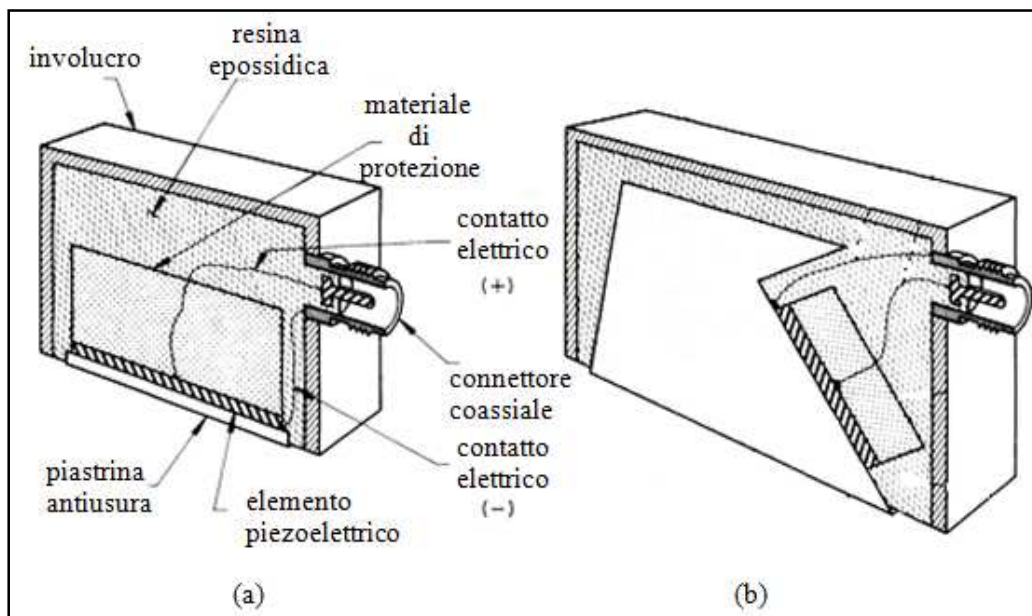


Fig. 1.10 esempi di sonda a contatto con fascio diritto (a) e fascio inclinato (b)

La piezoelettricità rende possibile il comportamento del trasduttore sia come elemento trasmettitore di oscillazioni e sia come ricevitore: come trasmettitore applicando una tensione elettrica di breve durata (impulso) al trasduttore questo si deforma e, al cessare della tensione, compie una serie di oscillazioni smorzate fino a riprendere la configurazione iniziale. In corrispondenza di ciascun impulso, il trasduttore sviluppa una successione di oscillazioni smorzate, costituenti un treno di onde. Tipicamente un pulsatore ultrasonico è in grado di

produrre da alcune centinaia a diverse migliaia di impulsi al secondo. L'ampiezza (e quindi la durata) di queste oscillazioni dipende dal valore della tensione applicata mentre la loro frequenza dipende dallo spessore del trasduttore. Invece come ricevitore quando il trasduttore in quiete viene appoggiato sulla superficie di un pezzo che vibra, la vibrazione è trasmessa per contatto. Se la frequenza di vibrazione coincide con quella propria del trasduttore, ossia quella per la quale esso oscilla spontaneamente, quest'ultimo produce vibrazioni apprezzabili, si viene dunque a costituire una tensione elettrica tra le due superfici, caratterizzata da un'alternanza delle posizioni dei segni + e - sulle superfici stesse, ogni qualvolta il trasduttore passa dalla condizione di massima estensione a quella di minima contrazione. In tali condizioni, il trasduttore oscillante equivale ad un generatore di tensione alternata, che viene trasmessa al pulsatore e da questo all'oscilloscopio.

Il fascio ultrasonoro in uscita dal trasduttore è caratterizzato dalla sua forma geometrica (dimensioni e campo) mentre il segnale ultrasonoro in ricezione (riflesso o trasmesso) è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- **ampiezza "a"** ovvero il valore di picco dell'impulso mostrato sullo schermo dello strumento in una rappresentazione detta A-scan (fig. 1.11).
- **tempo di volo "t"** ovvero il tempo intercorso tra l'impulso di trasmesso e quello ricevuto; sullo schermo dell'apparecchio tale tempo è indicato dalla distanza tra i due impulsi. Il tempo di volo fornisce la misura indiretta del percorso effettuato dall'onda ultrasonora nel mezzo.



Fig. 1.11 tipico apparecchio rilevatore ultrasonoro

In altre parole quando si appoggia la sonda sul pezzo da controllare il fascio emesso seguirà un certo percorso (regolato da parametri quali l'inclinazione del trasduttore e le leggi di rifrazione nei materiali) all'interno di esso interagendo con le diverse superfici incontrate, si otterranno quindi il segnale di partenza degli ultrasuoni (chiamato "eco di partenza") e quello riflesso dalla superficie opposta a quella d'entrata (chiamato "eco di fondo"), vengono visualizzati sullo schermo dello strumento con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano per percorrere il viaggio di andata e di ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale. Se durante tale percorso il fascio ultrasonoro incontra delle discontinuità sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde e sullo schermo, tra i due precedenti picchi (eco di partenza ed eco di fondo), ne compariranno altri che rappresentano delle indicazioni relative al tipo di discontinuità incontrate (fig. 1.12).

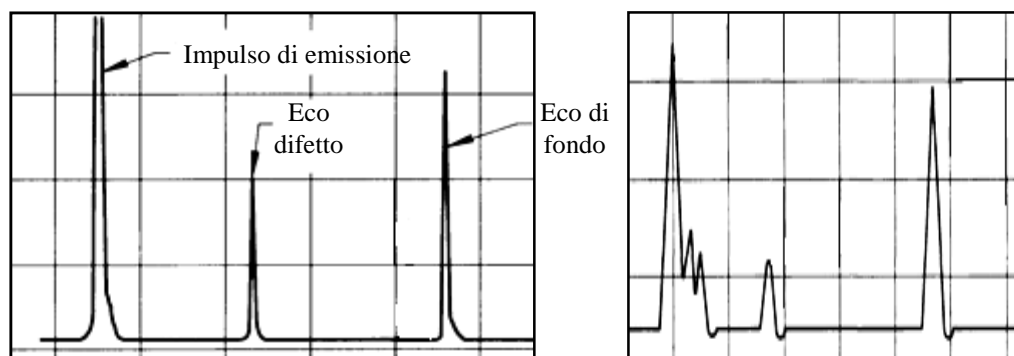


Fig. 1.12 esempi di visualizzazione

Per ottenere un buon accoppiamento tra la sonda ed il materiale da esaminare è necessario eliminare l'aria che vi si interpone, cosa che viene ottenuta mediante l'utilizzo di un mezzo di accoppiamento da interporre tra la sonda e la superficie da esaminare. Il mezzo di accoppiamento deve avere buone caratteristiche di bagnabilità, ed una buona trasparenza agli ultrasuoni. Il mezzo di accoppiamento deve essere scelto in modo da non danneggiare la superficie del particolare, in base all'esigenza tale mezzo può essere scelto tra olio, gel, acqua, glicerina ma l'importante è usare lo stesso mezzo di accoppiamento sia per la taratura della macchina che per il controllo.

Le superfici interessate dal controllo ad ultrasuoni devono essere sufficientemente lisce in modo tale da permettere una buona scorrevolezza del trasduttore. Dalla superficie di controllo devono essere rimosse: scorie, spruzzi di saldatura, polveri, sporcizia, vernice e quanto altro possa compromettere un buon accoppiamento tra sonda e la superficie da esaminare.

In generale, i CND eseguiti con il metodo ultrasonico si suddividono in due grandi famiglie: tecniche “pulse-echo” (o “eco-impulso”, “in riflessione”) in cui le onde ultrasoniche investono il pezzo da testare, penetrano in esso e vengono riflesse e rifratte dalle superfici che delimitano il componente stesso. Sono proprio le riflessioni interne (eco) che vengono esaminate e forniscono informazioni sulla presenza di eventuali difetti nel pezzo, invece le tecniche “through-transmission” (“ in trasmissione”) si esamina esclusivamente l’onda che ha attraversato il corpo senza tenere in considerazione le eco riflesse.

Nello schema di figura 1.13 è raffigurato un controllo in riflessione che impiega un solo trasduttore (che incorpora in sé le funzioni di trasmissione e ricezione). L’onda ultrasonica viene emessa dal trasduttore, attraversa il materiale e viene riflessa sia dalla superficie opposta del pezzo che dal difetto. Il segnale ultrasonico mostra dunque tre tracce distinte e facilmente identificabili.

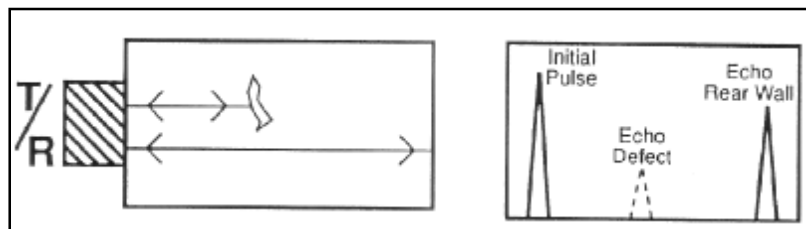


Fig. 1.13 tecnica pulse-echo

Le tecniche di esame si dividono in due classi: le “tecniche per contatto”, in cui il trasduttore è accoppiato direttamente al pezzo in esame (fig. 1.14a), e le “tecniche per immersione” che realizzano l’accoppiamento acustico mediante l’acqua, nella quale viene immerso il particolare da controllare (fig.1.14b). L’impiego dell’una e dell’altra tecnica è subordinato a considerazioni inerenti la forma geometrica dei pezzi da esaminare, il tipo e l’orientazione dei difetti da rilevare, la semplicità operativa e la velocità d’ispezione richiesta.

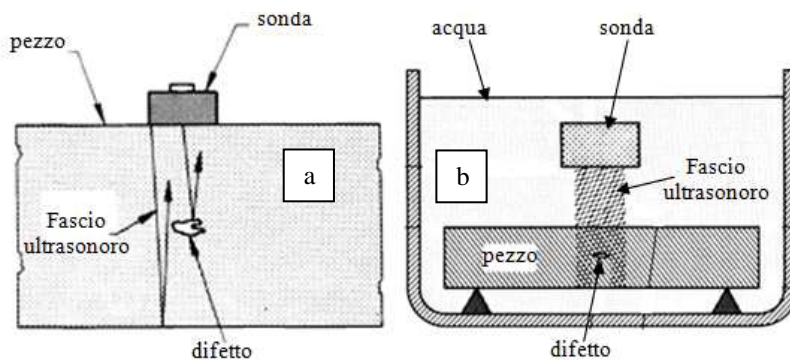


Fig. 1.14 tecnica a contatto (a), immersione (b)

Si focalizza l'attenzione riguardo alla tecnica pulse-echo con trasduttori a contatto angolati (fig. 1.15) che è quella che adotteremo per le prove sperimentali; un trasduttore angolato è costituito da un singolo cristallo orientato in modo tale da produrre onde ultrasoniche longitudinali o trasversali per ispezioni oblique. L'impiego tipico di questo tipo di sonde è la ricerca di difetti posizionati in modo non parallelo alle superfici del pezzo.

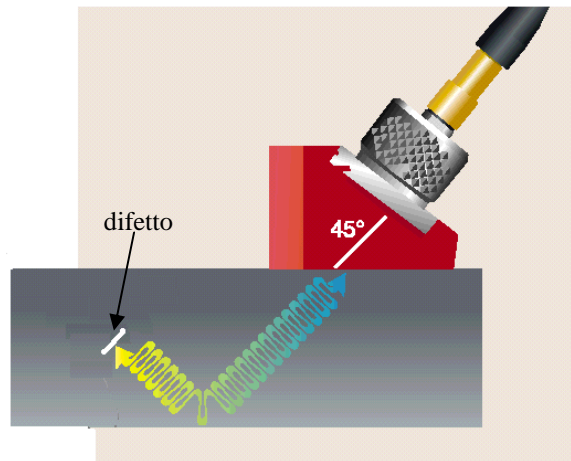


Fig. 1.15 trasduttore angolato (45°)

Questa configurazione (adottata per le ispezioni eseguite sia sui blocchi campione sia sugli assili) permette al trasduttore di generare le onde ultrasoniche sotto forma di impulsi che vengono riflessi dalla superficie opposta del pezzo o da eventuali discontinuità presenti al suo interno e raccolti dallo stesso trasduttore (che dunque in questo caso agisce da ricevitore). Il tempo necessario all'impulso per percorrere la distanza tra le due superfici opposte dell'oggetto è mostrato sul display dell'oscilloscopio (A-scan) e, per garantire una più facile leggibilità del segnale, gli impulsi sono inviati ad intervalli di tempo regolari. La presenza di un difetto dà origine ad un segnale che si colloca temporalmente in anticipo rispetto alla eco legata alla riflessione del fascio ultrasonico sulla superficie del pezzo opposta a quella di ingresso, oltre a questo tipo di rappresentazione, che è la più comune, ne esistono altre più sofisticate dove può essere evidenziata l'intera sezione del pezzo con le relative difettosità (S-scan) (fig. 1.5).

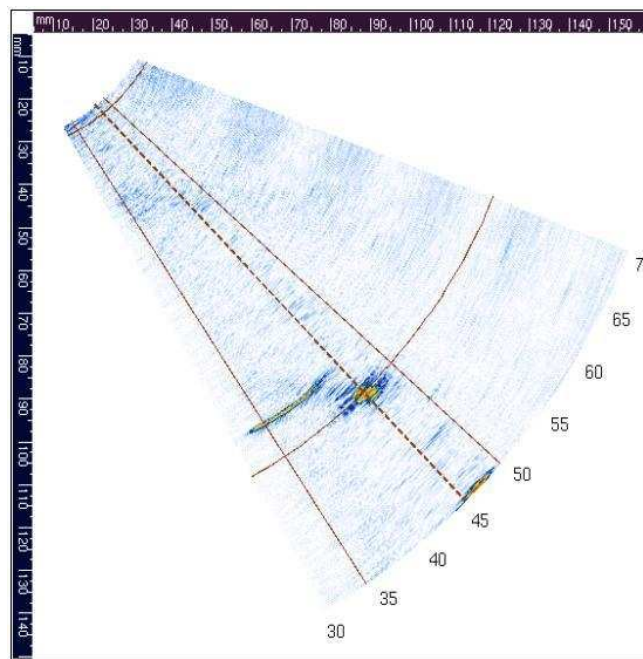


Fig. 1.5 esempio di S-scan

Il campo di maggiore applicazione è il controllo di saldature, lamiere, fucinati, stampati, fusioni e materiali compositi. Il metodo ad ultrasuoni è sicuramente il più diffuso e con fattore di crescita più elevato rispetto ad altri metodi non distruttivi impiegati per il rilievo dei difetti interni. Tale diffusione è dovuta: alla facilità con cui è possibile condurre l'esame, alla velocità d'esecuzione, all'elevato livello di sensibilità e all'ampio campo di spessori controllabili (fino a 10 m). Nel settore aeronautico, nucleare, petrolchimico e siderurgico, gli ultrasuoni hanno da tempo un impiego estensivo nei collaudi di accettazione, nei controlli di processo e nell'in-service inspection. Trova spazi sempre più vasti anche nella caratterizzazione dei materiali (ne è un esempio la valutazione della resistenza del cemento in base alla velocità di transito degli ultrasuoni). Recenti applicazioni degli ultrasuoni si sono avute nel controllo della qualità dei materiali compositi.

La possibilità di verificare l'integrità strutturale di un componente dipende fondamentalmente dalle caratteristiche fisico-chimiche e metallurgiche del materiale e dal tipo di discontinuità ricercate. L'opacità dei materiali (denominata anche "non trasparenza") agli ultrasuoni, è un effetto legato prevalentemente alle caratteristiche morfologiche della struttura del materiale ed è particolarmente evidente nelle saldature di acciaio austenitico, nei materiali fusi, nei materiali compositi e nei materiali ceramici di notevole spessore. In particolare, per i materiali metallici esso dipende dalla grandezza e dall'orientamento dei grani in relazione alla lunghezza d'onda del fascio ultrasonoro. In linea generale, nelle ispezioni di materiali non molto trasparenti

vengono utilizzate basse frequenze allo scopo di lavorare con un rapporto favorevole "lunghezza d'onda"/"dimensione dei grani"; tuttavia ci sono casi in cui tale accorgimento non risulta applicabile come ad esempio quando si debbano rilevare difetti molto piccoli. In altri casi l'opacità locale o generale del materiale in esame può deformare il fascio ultrasonoro e disperdere la sua energia iniziale.

Il problema del rilevamento di un difetto è legato anche all'influenza dell'impulso e del fascio ultrasonoro; in questo caso particolare importanza assumono le caratteristiche dell'apparecchiatura utilizzata (es. durata dell'impulso di trasmissione) e quelle del trasduttore (es. caratteristiche generali del fascio). La corretta interpretazione dell'eco di un difetto richiede una sufficiente separazione, sulla base dei tempi dello schermo, tra l'impulso dell'onda riflessa e quello dell'onda trasmessa, o comunque tra l'eco di prima interfaccia e l'eco proveniente da una discontinuità. Poiché la durata dell'impulso emesso dalla sonda non può essere inferiore ad un certo valore minimo, ne consegue che utilizzando un trasduttore di comune applicazione (normale o angolato) non è possibile rilevare un difetto la cui posizione sia localizzata in prossimità della superficie del componente. In altre parole esiste una "zona morta" più o meno estesa, in cui i due impulsi risultano sovrapposti.

Una delle maggiori difficoltà di applicazione di questo metodo di analisi non distruttiva deriva da particolari geometrie del componente in esame che non risultano accessibili all'ispezione ultrasonora. Basti pensare ad esempio alla difficoltà di eseguire il controllo di gomiti o valvole su impianti realizzati senza prevedere sufficienti spazi per la manovra delle sonde; molte volte però tali difficoltà sono determinate dalle dimensioni e dalla natura del materiale, nonché dalla complessità costruttiva del componente. Anche l'eccessiva rugosità della superficie di scansione nelle ispezioni a contatto o casi in cui non è possibile utilizzare dei mezzi di accoppiamento perché alterano il materiale in esame, costituisce una seria limitazione all'applicazione del metodo ultrasonoro.

I principali vantaggi forniti dal controllo ultrasuoni rispetto agli altri metodi di controllo non distruttivo riguardano innanzitutto il maggior potere di penetrazione nel mezzo, cosa che consente di rilevare anche discontinuità che si trovano all'interno del materiale. Il controllo del materiale può essere fatto anche a diversi metri di profondità, per esempio nel controllo assiale di alberi d'acciaio molto lunghi o in pezzi fucinati; hanno un'elevata sensibilità che permette di rilevare discontinuità molto piccole, consentono miglior precisione nella determinazione della posizione dei difetti interni, nella valutazione della loro forma ed orientamento, è sufficiente che una sola superficie del particolare sia accessibile, è un controllo elettronico che fornisce immediatamente il rilievo dei difetti cosa che rende il metodo adatto all'automazione, al controllo rapido, al controllo in linea, inoltre il metodo non presenta pericoli di radiazioni e non ha alcun effetto secondario sul personale e su altre apparecchiature poste nelle vicinanze ed è facilmente trasportabile.

Gli svantaggi del controllo ultrasonoro sono invece citati qui di seguito: le operazioni richiedono grande attenzione ed esperienza del personale, la definizione delle procedure di controllo richiede competenze tecniche, i particolari con superficie con elevata rugosità o molto piccoli o sottili o non omogenei vengono controllati con grande difficoltà, le discontinuità presenti nello strato immediatamente al di sotto della superficie possono sfuggire al controllo, occorre impiegare mezzi d'accoppiamento per facilitare la trasmissione degli ultrasuoni dal trasduttore al materiale da controllare e sono richiesti dei campioni di riferimento, tanto per la calibrazione dell'apparecchiatura che per la caratterizzazione dei difetti [1,2].

Nella specifica applicazione del controllo ultrasonoro di assili ferroviari le tecniche d'indagine risultano accomunate dal fatto di essere tutte tecniche che usano trasduttori a contatto, di seguito si citano le più adatte per assili pieni e cavi: il metodo che sfrutta le onde di superficie può essere impiegato per localizzare difetti affioranti, in queste applicazioni, la superficie funziona come una "guida d'onda", ma la sonda di emissione e di ricezione non può stare troppo lontana dal riflettore in quanto questo tipo di propagazione è caratterizzata da forte attenuazione (provocata dalla rugosità superficiale); considerando invece le sonde ad incidenza inclinata, si possono individuare due casi fondamentali: rilevazione dei difetti in secondo percorso (sonda posizionata sulla superficie esterna del pezzo) e in primo percorso (possibile solo per gli assili cavi in quanto la sonda viene fatta scorrere all'interno) quest'ultimo si effettua di norma con particolari strumentazioni chiamate borosonde (vedi cap. 3.2), l'interpretazione degli ecogrammi risulta però spesso complicata dalla concomitanza di eco derivanti da riflessioni determinate dalle geometrie variabili quasi sempre presenti negli alberi (variazioni di sezione, lavorazioni di superficie per collegamenti, ecc.); infine la tecnica chiamata TOFD nella quale le onde vengono emesse da una sonda ad incidenza inclinata e rilevate da una sonda ricevente separata: le due sonde sono reciprocamente accoppiate e disposte lungo una generatrice dell'albero ad eguale distanza dalla cricca [7].

Capitolo 2

Analisi ultrasonora di difetti artificiali: controlli di individuazione

L'approccio classico nel campo delle prove non distruttive prevede che le relazioni quantitative tra la risposta del metodo adottato e la dimensione del difetto siano tipicamente fornite o ricavate in funzione di una opportuna dimensione lineare (profondità, diametro,...) del difetto stesso, esempi di tali relazioni sono le curve "Probability of Detection"[8], le curve ADA per gli ultrasuoni [9] o i limiti di accettabilità del metodo liquidi penetranti applicato alle saldature [10].

Si analizzeranno le risposte UT ottenute sperimentalmente da cricche di fatica generate su assili ferroviari e le si confronteranno con quelle ricavate da difetti artificiali presenti su spezzoni di assile (fig. 2.1 diametro esterno 152 mm, foro barenato 65mm) di forme significativamente differenti ottenuti mediante lavorazioni tradizionali (fori e fresate) o innovative (difetti concavi o convessi per elettro-erosione). Le misure sono state eseguite sia mediante sonde tradizionali monocristallo, sia mediante un sistema phased array.



Figura 2.1 blocchi campione

L'elaborazione dei risultati sperimentali ha permesso di osservare che le curve ottenute dai difetti artificiali, significativamente differenziate se diagrammate in funzione della profondità del difetto, collassano su una singola curva, corrispondente a quella delle cricche di fatica, se diagrammate in termini di area

riflettente. Tale risultato permette di ripensare in un'ottica completamente nuova la forma dei difetti artificiali adottabili, ad esempio, in blocchi campione per la taratura dei sistemi UT per l'ispezione di assili ferroviari sia in fase di produzione, sia di manutenzione durante il normale esercizio [11].

2.1 Descrizione della strumentazione

Per le analisi sono state utilizzate due tipologie di strumenti:

1. Rilevatore digitale ultrasonoro Gilardoni RDG 500 [12]
2. Harfang X-32 [13]

Il primo rilevatore è dotato di uno schermo ad alta luminosità che permette di visualizzare in maniera tradizionale i risultati della scansione effettuata sul pezzo in esame in quanto compaiono solamente le informazioni relative all'A-scan che è il tipo di presentazione più frequentemente adottata. A lato dello schermo è anche presente una tastiera con cui l'operatore può interagire per impostare e regolare i parametri del controllo (fig. 2.2).



Figura 2.2 Rilevatore digitale ultrasonoro Gilardoni RDG 500

Si abbina al rilevatore descritto precedentemente la sonda denominata ATM45-4 con le seguenti caratteristiche: sonda a singolo cristallo piezoelettrico di dimensioni 8 x 9 mm con frequenza 4 MHz e inclinazione del fascio in acciaio dolce di 45° [1,14] (fig. 2.3). Inoltre per aver un miglior accoppiamento tra sonda e pezzo in esame è previsto un supporto in plexiglass opportunamente sagomato e l'utilizzo di grasso come accoppiante.

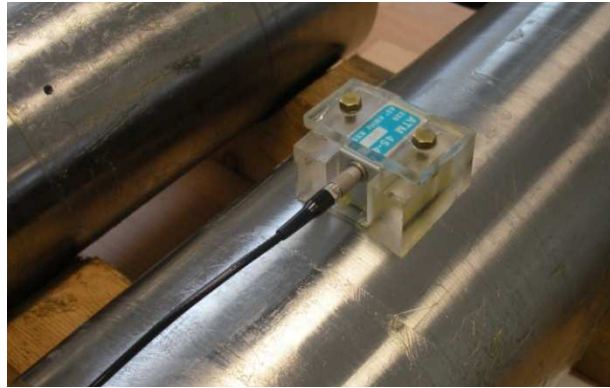


Figura 2.3 sonda ATM45-4 con zoccolo in plexiglass

La seconda strumentazione si differenzia dalla prima per il tipo di rilevatore di nuova concezione e nel tipo di sonda utilizzata, grazie a questa combinazione si è in grado di ottenere diverse rappresentazioni dei risultati oltre a quelle comuni come l'A-scan tra cui spicca la possibilità di rilevare le difettosità di un'intera sezione del pezzo (S-scan).

Anch'essa è dotata di uno schermo ad alta luminosità a colori TFT-LCD e interagisce con l'operatore attraverso una tastiera disposta intorno al riquadro riservato all'oscillogramma (fig. 2.4).



Figura 2.4 rilevatore Harfang X-32

La sonda affiancata a questo rilevatore denominata phased array ha una frequenza di 5 MHz ed è costituita da 32 cristalli disposti linearmente con passo

0.8mm e dimensioni 0.762 x 12 mm [15] montata su uno zoccolo in rexolite (fig. 2.5), per l'accoppiamento si usa del comune grasso.



Figura 2.5 sonda phased array con zoccolo in rexolite

2.2 Fasi preliminari

Innanzitutto i difetti devono essere coperti con dello scotch trasparente in modo da evitare che il grasso entri nelle cavità e influenzi la lettura dello strumento, poi si passa al montaggio della sonda nello zoccolo interponendo tra di loro un sottile strato di grasso (questo per far sì che il fascio ultrasonoro passi dalla sonda attraverso lo zoccolo ed entri nel pezzo) dopodiché anche sul pezzo e in particolare nelle zone entro le quali muoviamo la sonda per effettuare la ricerca dei difetti viene spalmato del grasso per facilitare l'accoppiamento tra sonda e pezzo. In fine si passa all'operazione di calibrazione che può essere per comodità eseguita direttamente sul pezzo.

2.2.1 Calibrazione

Quest' operazione viene eseguita ogni qualvolta si ha a che fare sia con un nuovo pezzo in esame sia quando si cambia sonda in quanto le caratteristiche dei materiali influenzano le velocità di propagazione delle onde sonore e quindi i relativi tempi di volo all'interno del pezzo e conseguentemente lo spazio percorso dal fascio ultrasonoro, cosa molto importante perché è il punto di partenza delle nostre analisi, per tale motivo si sceglie di calibrare le sonde

direttamente sul pezzo che tra l'altro possiede la stessa rugosità superficiale degli assili che esamineremo in seguito.

Si effettua allo stesso modo indipendentemente dal tipo di strumentazione usata (vedi figura 2.6): si sfrutta la geometria del pezzo in quanto lo spigolo di questo può essere considerato un grande riflettore, si appoggia la sonda sul pezzo come se si stesse effettuando una normale indagine ma si cerca il punto dal quale il fascio uscendo dalla sonda percorre il pezzo e rimbalzando tra le pareti (se non incontra difetti) incontra lo spigolo e ritorna indietro facendo così apparire sullo schermo della centralina un picco (eco o risposta). Una volta trovato il punto si cerca di massimizzare questo picco muovendo accuratamente la sonda, dopodichè lavorando sul guadagno lo si porta all'80% del fondo scala (per comodità e coerenza con le future analisi prendiamo come riferimento questo valore) a questo punto leggiamo dallo strumento il percorso del fascio e confrontandolo con il percorso teorico calcolato con semplici considerazioni trigonometriche come nell'eq. (2.1) si ha un'idea dell'errore commesso e si va ad agire aumentando o diminuendo il ritardo in modo da visualizzare il picco alla distanza corretta.

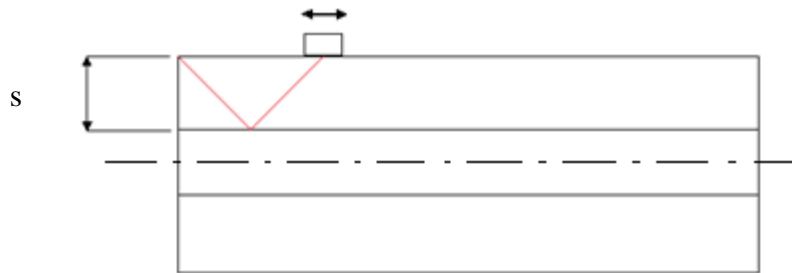


Figura 2.6 schema calibrazione sul pezzo campione

$$\text{percorso teorico} = \frac{s}{\cos(\text{angolo})} \cdot 2 \quad (2.1)$$




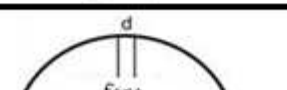
2.3 Descrizione dei tipi di controllo effettuati

I controlli riguardanti i blocchi campione saranno effettuati con due diverse modalità, la prima consiste nella ricerca dei difetti in secondo percorso ovvero posizionando la sonda sull'esterno del pezzo, la seconda invece verrà effettuata in primo percorso facendo scorrere la sonda sulla superficie interna.

2.4 Difetti artificiali 2° percorso

Si passa ora all'esecuzione della vera e propria indagine ultrasonora sui blocchi campione che per questa prima prova viene effettuata facendo scorrere sulla superficie esterna del pezzo la sonda con apposito zoccolo, al fine di determinare la risposta in decibel di ogni singolo difetto per relazionarla con la dimensione caratteristica e l'area investita dal fascio.

Sui blocchi campione sono stati ricavati mediante elettroerosione e lavorazioni tradizionali alcune geometrie di difetti (fig.2.7) di diverse dimensioni tra cui fori, fresate, intagli concavi (simulano le cricche da fretting-fatica) e convessi (simulano le cricche da fatica) vedi tab 2.1.

TIPO	DIMENSIONE CARATTERISTICA [mm]
 fresata	3
	2
	1
	0,5
 Difetto concavo (fretting)	3
	2
	1
	0,5
 Difetto convesso (fatica)	8
	4
	2
	1
	0,5
 foro	6
	4
	3

Tab 2.1 difetti artificiali presenti nei blocchi campione

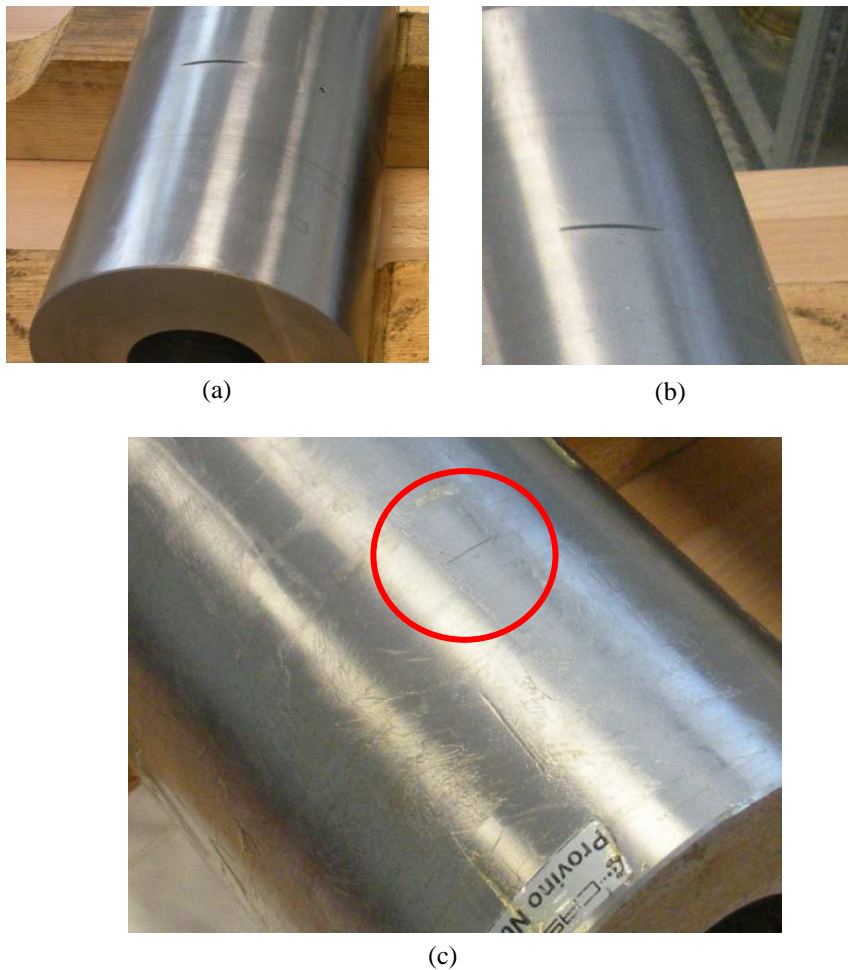


Fig. 2.7 difetti artificiali concavo e foro (a), fresata (b), convesso (c)

Si procede all'individuazione dei difetti con il primo rilevatore descritto (Gilardoni RDG 500) al quale è abbinata la sonda angolare ATM45-4; la modalità denominata 2° percorso consiste nel ricercare i difetti facendo compiere al fascio ultrasonoro invece che un tragitto diretto un doppio percorso (fig. 2.8) a 45 gradi (che è l'inclinazione del fascio rifratto nell'interfaccia plexiglass-acciaio), ovvero ricercare il punto in cui il fascio dopo un rimbalzo sulla superficie interna va ad impattare il difetto (massimizzazione dell'eco di risposta ovvero il punto dove abbiamo il massimo del ritorno di energia) e ritorna indietro, il segnale viene quindi visualizzato sullo schermo della centralina sottoforma di un picco (fig. 2.9) si procede quindi ad un affinamento della scansione portando il picco all'80% del fondo scala (regolazione del guadagno).

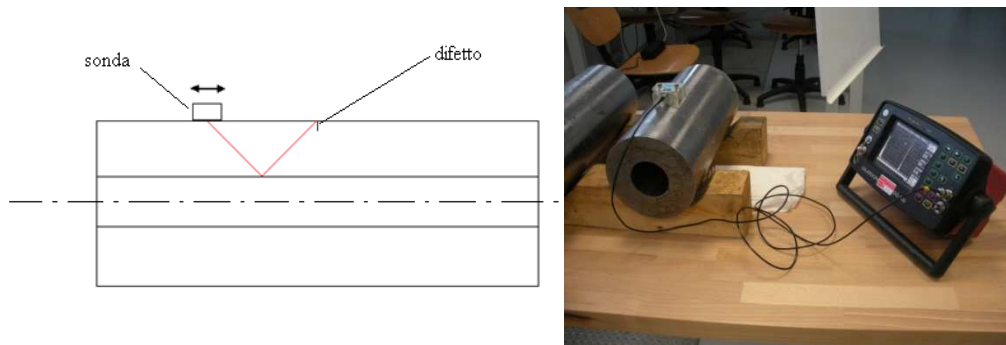


Fig 2.8 schema dell' indagine con sonda 45°

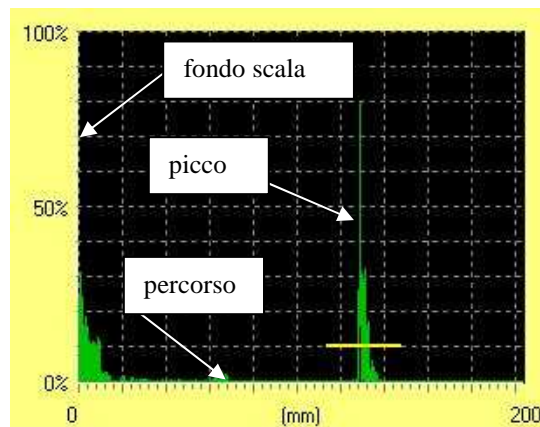


Figura 2.9 A-scan di un difetto (fresata 3 mm)

Harfang X-32 individuazione difetti in 2° percorso con sonda phased array

Per quanto riguarda il rilevatore Harfang X-32 in combinazione con la sonda phased array l'individuazione dei difetti si esegue con le stesse modalità descritte per il rilevatore Gilardoni ma con la possibilità di visualizzare il risultato della scansione in un altro modo ovvero l' S-scan (simile a un'ecografia). Anche qui però si ha la possibilità di avere gli A-scan relativi a diversi angoli di inclinazione del fascio, quindi per avere un confronto con l'altra strumentazione trascriveremo i risultati relativi a 45 gradi (fig 2.10).

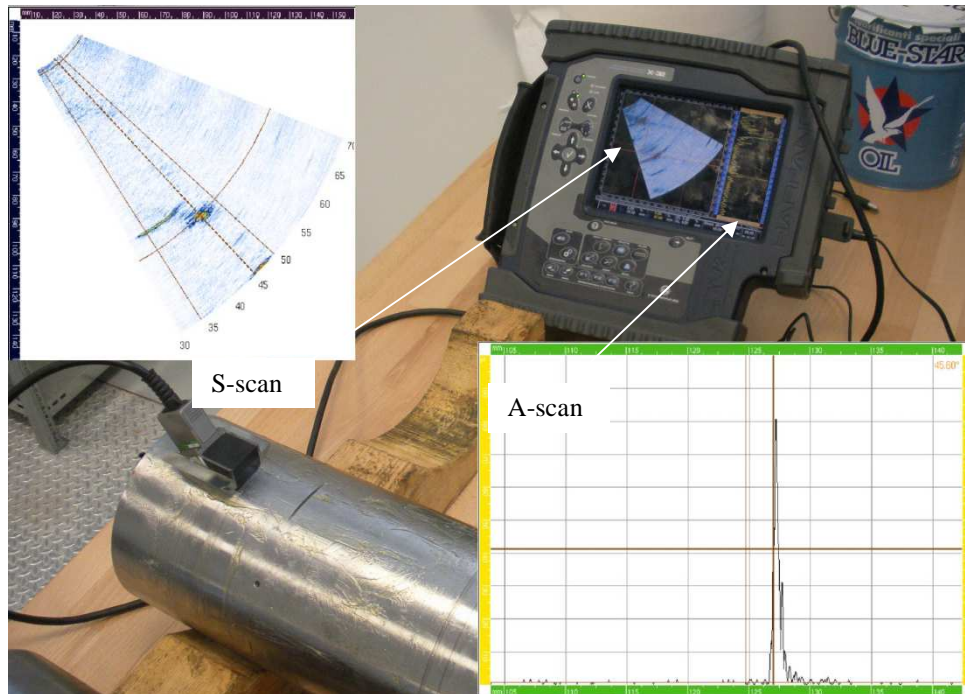


Fig. 2.10 A-scan e S-scan di un difetto (fresata 3mm)

2.4.1 Dati acquisiti Gilardoni RDG 500

Di seguito si riportano i dati relativi alle prove sopra descritte.

Le risposte ottenute verranno relazionate sia con la dimensione caratteristica sia con l'area investita dal fascio per ogni difetto. Per il calcolo di queste aree serve innanzitutto determinare, tramite semplici relazioni, le dimensioni del fascio ultrasonoro (fig. 2.11) come mostrato dalle eq. (2.2), operazione necessaria per stabilire se il difetto è totalmente investito dal fascio (quindi si prende come area investita l'area frontale del difetto) oppure se una o entrambe (il fascio ha una sezione frontale rettangolare) le dimensioni del fascio sono contenute dal difetto (l'area investita verrà calcolata a seconda delle dimensioni del fascio). Di seguito si riportano i passi seguiti per il calcolo delle dimensioni del fascio:

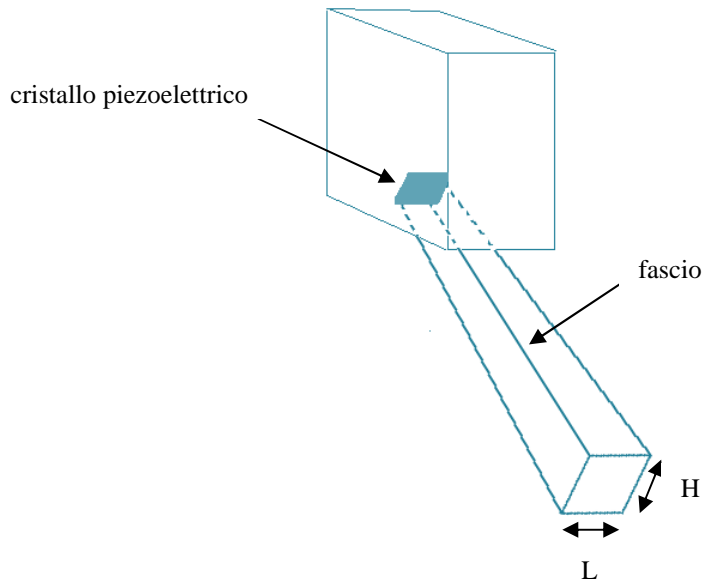


Figura 2.11 dimensioni fascio

$$\lambda = \frac{Vt}{f}$$

$$b1 = p \cdot K_alfa \cdot \lambda / L \quad (2.2)$$

$$b2 = p \cdot K_alfa \cdot \lambda / H$$

Risultati, simbologia adottata insieme alle caratteristiche del fascio ultrasonoro associato alla sonda ATM45-4 sono riassunti nella tabella seguente (tab. 2.2)

Sonda ATM45-4	45° (0,785 radianti)
Larghezza cristallo (L)	9 mm
Altezza cristallo (H)	8 mm
Frequenza (f)	4000000 Hz

Velocità trasversale (V_t)	3230 m/s
K_{α} (fattore da tab.)	0,91
Percorso teorico (p)	123,04 mm
Lunghezza d'onda (λ)	0,0008075 m
Semilarghezza fascio (b_1)	10,0455 mm
Semialtezza fascio (b_2)	11,3012 mm

Tab 2.2 caratteristiche fascio ultrasonoro sonda ATM45-4

Per chiarire come si sono calcolate le aree investite riportiamo degli esempi riguardanti alcuni difetti.

Fresata 3 x 43:

La sezione frontale del fascio ha rispettivamente altezza e larghezza 22 x 20 ma a noi interessa la semialtezza (11 mm) perché supponiamo che il fascio investa il difetto nel corner.

Quindi dato che la larghezza del fascio è minore di quella del difetto (20 mm contro i 43 del difetto) mentre la semialtezza è di gran lunga maggiore della profondità del difetto l'area investita sarà calcolata come se fosse un'area rettangolare (vedi fig. 2.12) con la seguente espressione:

$$\text{area investita} = \text{profondità difetto} \times \text{larghezza fascio.}$$

In realtà questa è un'approssimazione dell'area effettiva (non è un rettangolo perché la superficie esterna del pezzo è curva), per ottenere un risultato più preciso ci serviamo dell'aiuto di un software di modellazione solida CATIA o SOLID EDGE che ci permette di disegnare l'effettiva area investita dal fascio, in questo caso 55,1 mm².

Questo modo di procedere vale anche per i difetti fresata 2 mm e 1mm.

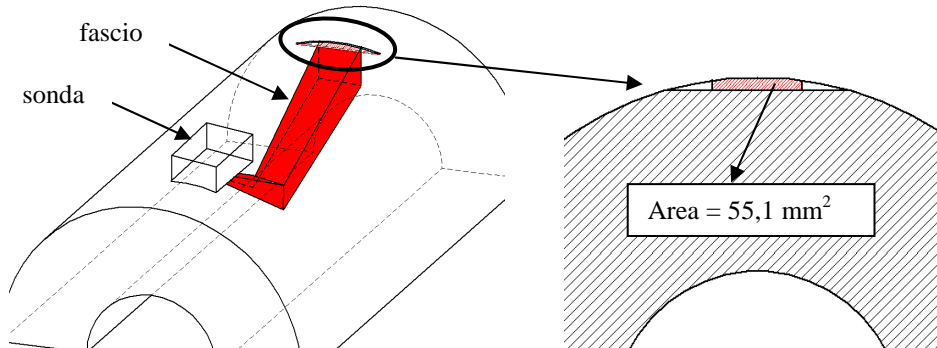


Figura 2.12 area difetto investita dal fascio (fresata 3 mm)

Per gli altri difetti (fresata 0.5mm e concavi 3,2,1,0.5) che hanno una larghezza inferiore alla larghezza del fascio l'area viene calcolata come:

$$\text{area investita} = \text{profondità difetto} \times \text{larghezza difetto}$$

quindi l'area effettiva della sezione frontale del difetto (usiamo come al solito il programma di disegno per avere un risultato più preciso fig.2.14).

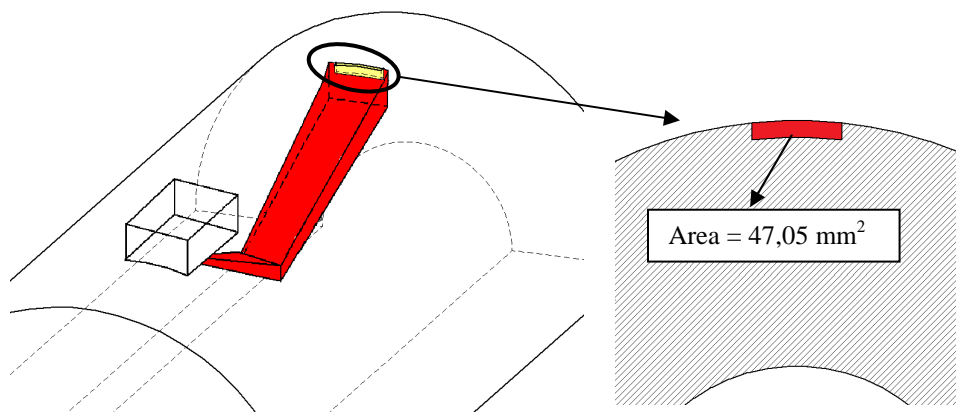


Figura 2.13 area difetto investita dal fascio (concavo 3 mm)

Mentre invece per i convessi calcoliamo l' area servendoci della formula per il calcolo dell'area delle ellissi eq.(2.3) essendo il difetto una semiellisse:

$$(\pi * a * b)/2 \quad (2.3)$$

Dove a e b sono i semiassi dell'ellisse ovvero il raggio e la semilarghezza.

La tabella sottostante (tab. 2.3) riassume dimensioni, valore di risposta relativo al picco visualizzato nell'A-scan (fig. 2.14) e area investita dal fascio di ogni difetto.

FRESATE			
dimensione caratteristica			
profondità [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
3	43	67	55,1
2	35	70	35,52
1	24	72,5	15,61
0,5	18	77	5,806126491

CONCAVI			
dimensione caratteristica			
profondità [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
3	16	66	47,05263158
2	16	71	31,57894737
1	16	72,5	15,89473684
0,5	15	76	7,973684211

CONVESSI			
dimensione caratteristica			
raggio [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
8	16	59,5	100,5309649
4	8	67	25,13274123
2	4	80	6,283185307
1	2	92	1,570796327

FORI		
dimensione caratteristica		
diametro [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
6	77,75	19,89675347
4	81,25	12,21730476
3	84,5	9,162978573

Tab 2.3. analisi difetti artificiali con rilevatore RDG 500

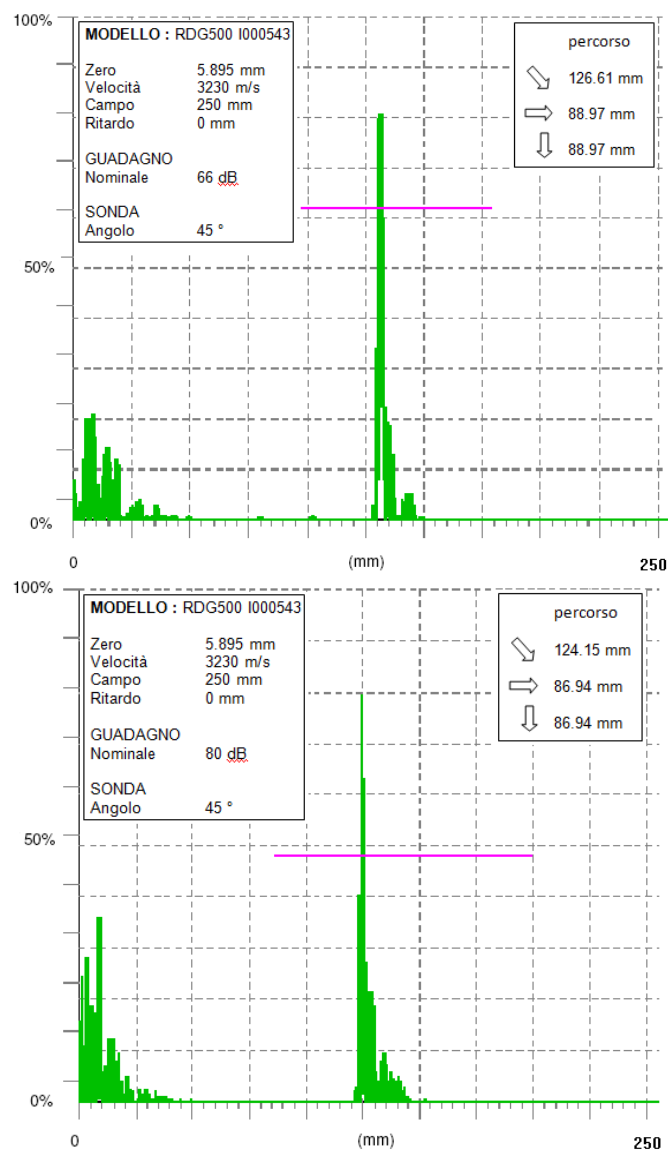
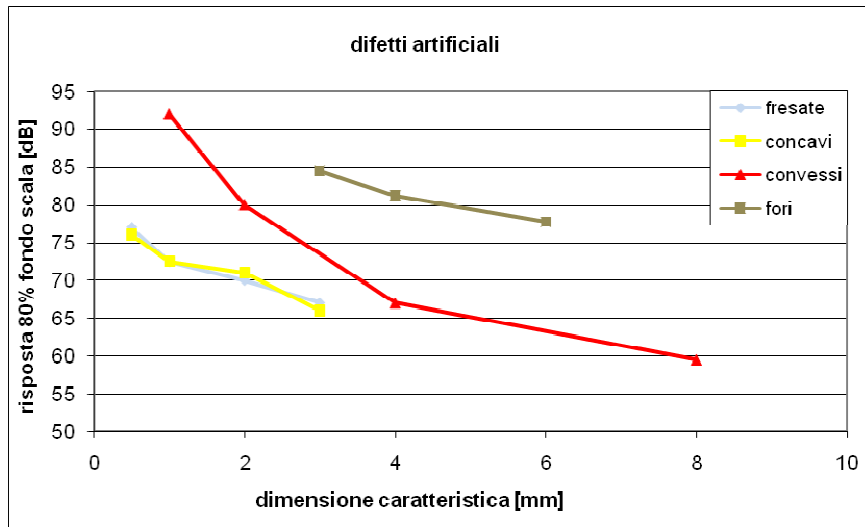


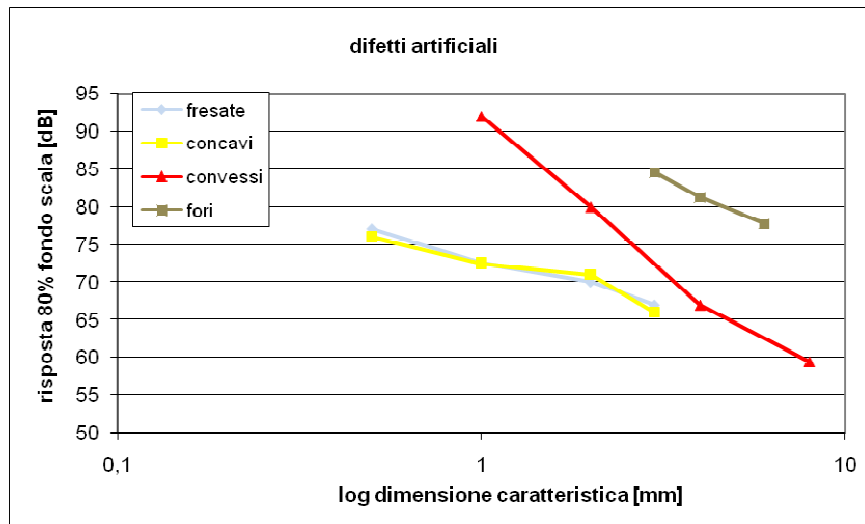
Fig. 2.14 A-scan concavo 3mm , convesso 2 mm

Come si poteva supporre all'aumentare della dimensione caratteristica del difetto è necessaria una minor quantità di energia sonora per individuarlo (tab. 2.3), inoltre da questo punto in poi tralascieremo le risposte dei fori in quanto avendo una superficie riflettente complessa non è possibile confrontarli con gli altri difetti.

È anche possibile osservare una dipendenza delle risposte UT dalla geometria del difetto, in particolare intagli concavi e fresate geometricamente confrontabili rispondono in maniera pressoché uguale mentre quelli convessi a pari profondità rispondono diversamente (fig 2.15a,b).

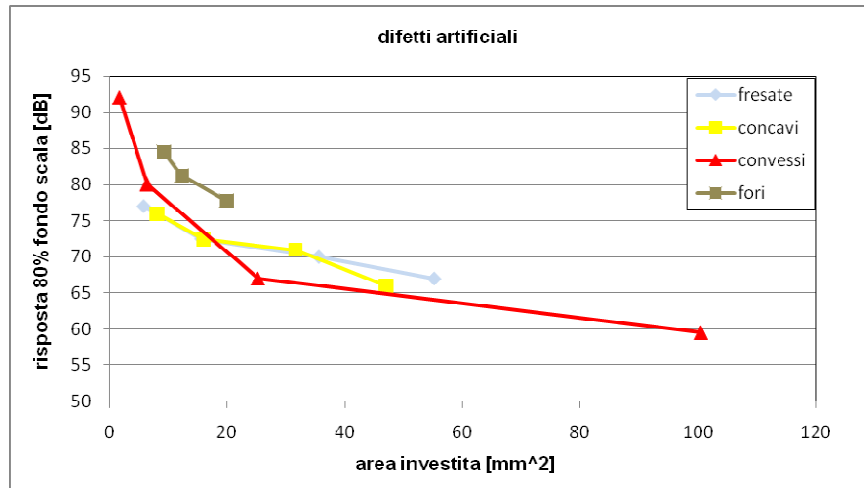


(a)

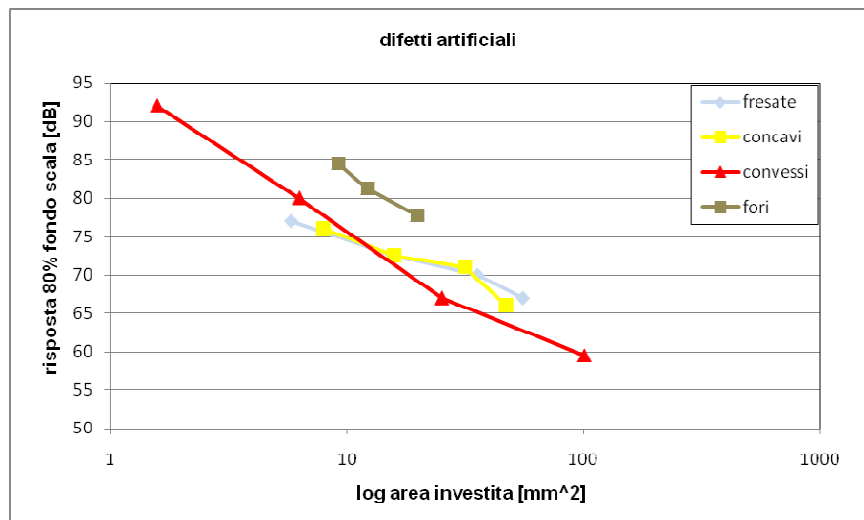


(b)

Per ovviare al problema della dipendenza dalla geometria si è deciso quindi di caratterizzare i difetti considerando l'area del difetto effettivamente investita dal fascio ultrasonoro (fig. 2.15c), in questo caso sembra sparire la dipendenza dalla forma dell'intaglio infatti le curve sembrano collapsare su un'unica curva. Da notare che tale curva assume un andamento lineare in un diagramma semi-logaritmico (fig. 2.15d).



(c)



(d)

Fig. 2.15 Risposte UT difetti artificiali in funzione della profondità (a), in scala semilogaritmica (b), dell'area investita (c) e in scala semi-logaritmica (d)

2.4.2 Dati acquisiti Harfang X-32

Le risposte ottenute verranno relazionate sia con la dimensione caratteristica sia con l'area investita dal fascio per ogni difetto. Anche per questa sonda si calcolano prima le dimensioni del fascio (tab. 2.4) poi per le aree si seguono gli stessi ragionamenti descritti precedentemente.

<i>Sonda phased array</i>	<i>32 cristalli</i>
<i>Passo</i>	0,8 mm
<i>Inclinazione singolo cristallo</i>	45° (0,785 radianti)
<i>Larghezza singolo cristallo (L)</i>	12 mm
<i>Altezza singolo cristallo (H)</i>	0,762 mm
<i>Frequenza (f)</i>	5000000 Hz
<i>Velocità longitudinale (Vl)</i>	5920 m/s
<i>K_alfa (fattore da tab.)</i>	0,91
<i>Percorso teorico (p)</i>	123,04 mm
<i>Lunghezza d'onda (λ)</i>	0,001184 m
<i>Semilarghezza fascio (b1)</i>	11,0474 mm
<i>Semialtezza fascio (b2)</i>	173,9692 mm

Tab. 2.4 caratteristiche fascio ultrasonoro sonda phased array

La tabella sottostante (tab. 2.5) riepiloga i risultati delle analisi dei difetti artificiali effettuate con il rilevatore Harfang X-32 mentre la figura 2.16 mostra alcuni esempi di S-scan e A-scan.

FRESATE			
dimensione caratteristica			
profondità [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
3	43	17	84,90907335
2	35	19	46,31095602
1	24	22	16,40595484
0,5	18	30	5,806126491

CONCAVI			
dimensione caratteristica			
profondità [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
3	16	12,5	47,05263158
2	16	21,5	31,57894737
1	16	23	15,89473684
0,5	15	29	7,973684211

CONVESSI			
dimensione caratteristica			
raggio [mm]	larghezza [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
8	16	10	100,5309649
4	8	15	25,13274123
2	4	28,5	6,283185307
1	2	41,5	1,570796327

FORI		
dimensione caratteristica		
diametro [mm]	risposta 80% [dB]	area investita difetto [mm ²]
6	26	19,89675347
4	27,5	12,21730476
3	31	9,162978573

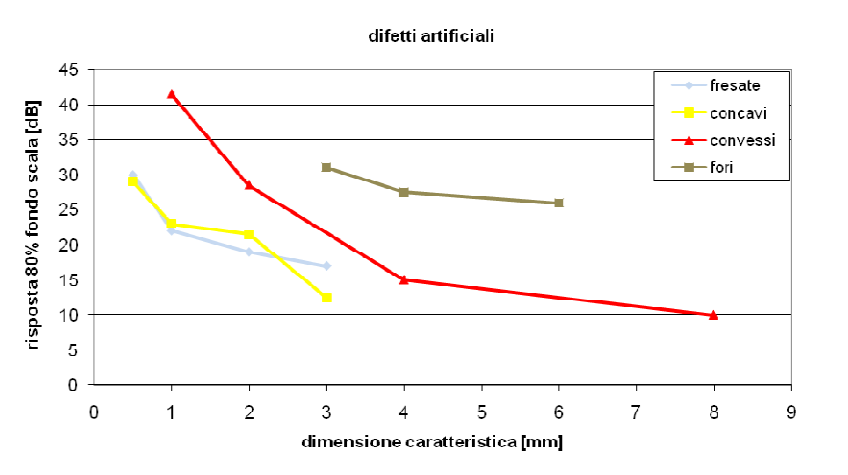
Tab 2.5. analisi difetti artificiali con rilevatore Harfang



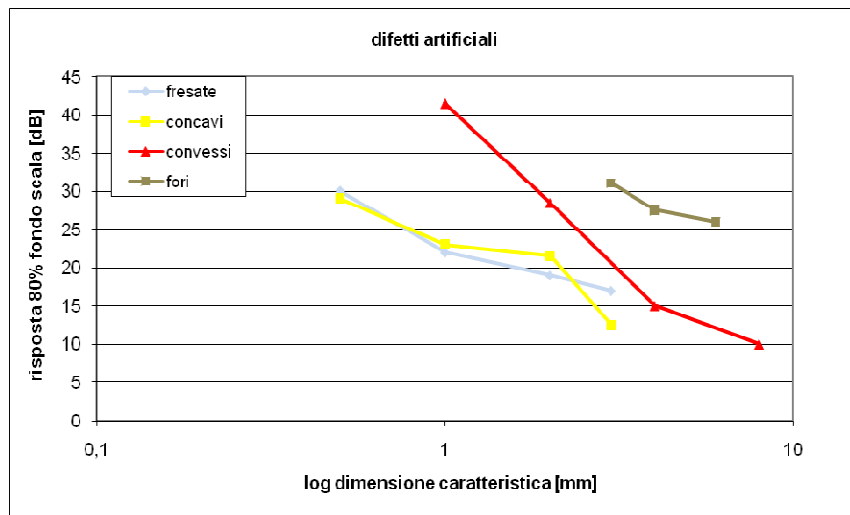
Fig. 2.16 S-scan e A-scan relativo all'angolo di 45° dei difetti concavo 3mm e convesso 2mm.

Anche per quanto riguarda le acquisizioni con il rilevatore Harfang X-32 si possono ripetere le considerazioni riportate precedentemente:

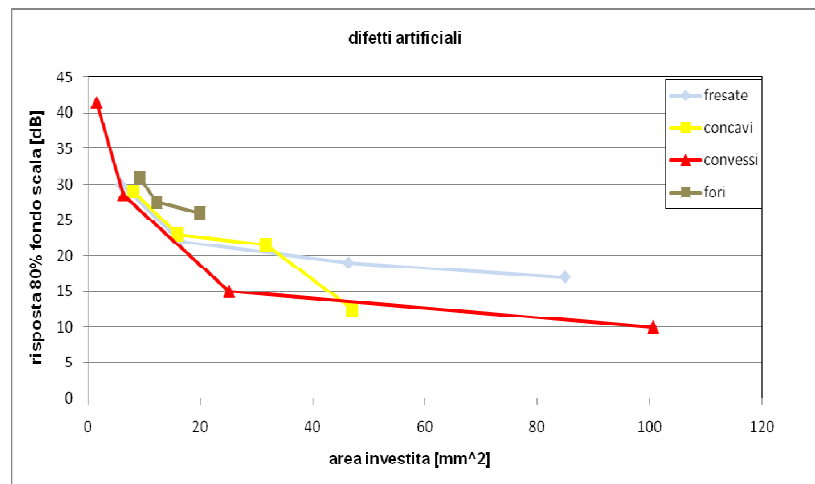
- Energia sonora decresce all' aumentare della dimensione caratteristica dell'intaglio (fig. 2.17a)
- Dipendenza dalla forma se diagrammata in funzione della profondità (fig. 2.17a,b)
- Perdita della dipendenza dalla geometria se diagrammata in funzione dell' area investita dal fascio ultrasonoro (fig. 2.17c)
- Andamento lineare nel grafico semi-logaritmico (fig. 2.17b,d)



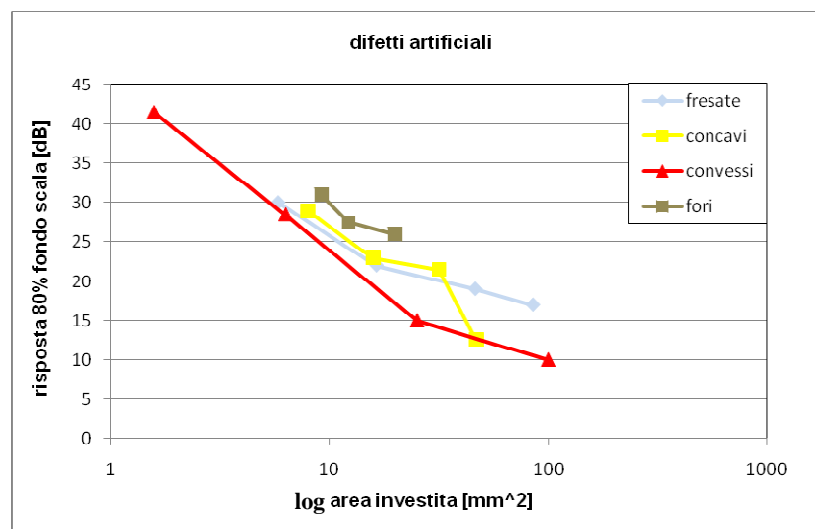
(a)



(b)



(c)

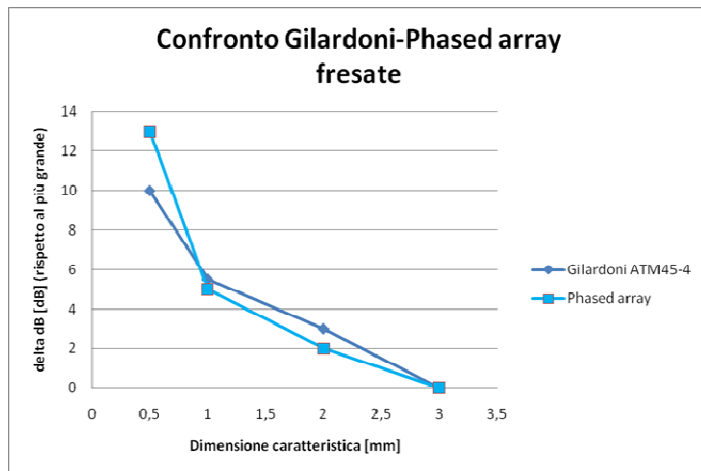


(d)

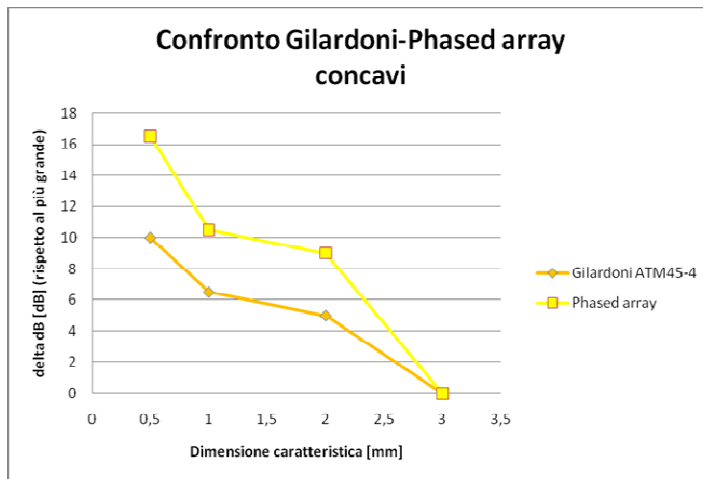
Fig. 2.17 Risposte UT difetti artificiali in funzione della profondità (a) in scala semilogaritmica (b), dell'area investita (c) e in scala semi logaritmica (d)

2.4.3 Confronto Gilardoni-Harfang

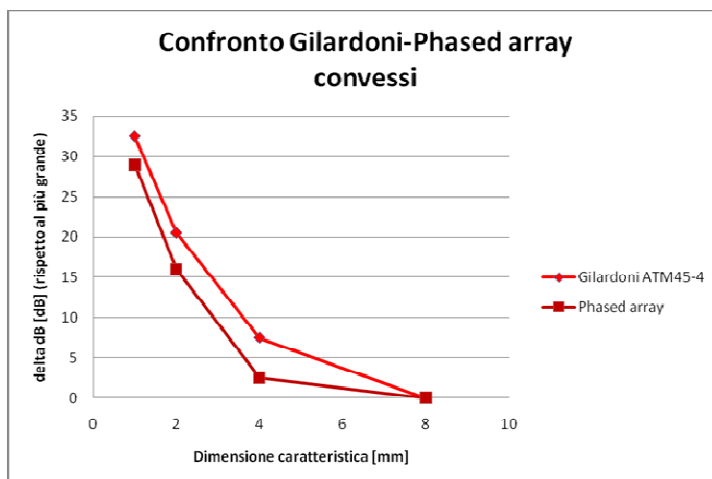
Per confrontare le risposte delle due strumentazioni si sono seguite due strade, la prima consiste nel convertire le risposte in termini di differenza di decibel rispetto al più grande (ovvero quello rilevato con minor decibel) per ogni categoria di difetto (fig. 2.18a,b,c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.18a,b,c confronto risposte UT tra le due strumentazioni

Sembra che le due strumentazioni, almeno per le fresate e i convessi, abbiano la medesima sensibilità nel rilevare i difetti. Un ulteriore aiuto ci arriva dalla visualizzazione dei grafici delle risposte in funzione dell'area investita dal fascio in scala semi-logaritmica (fig.2.19).

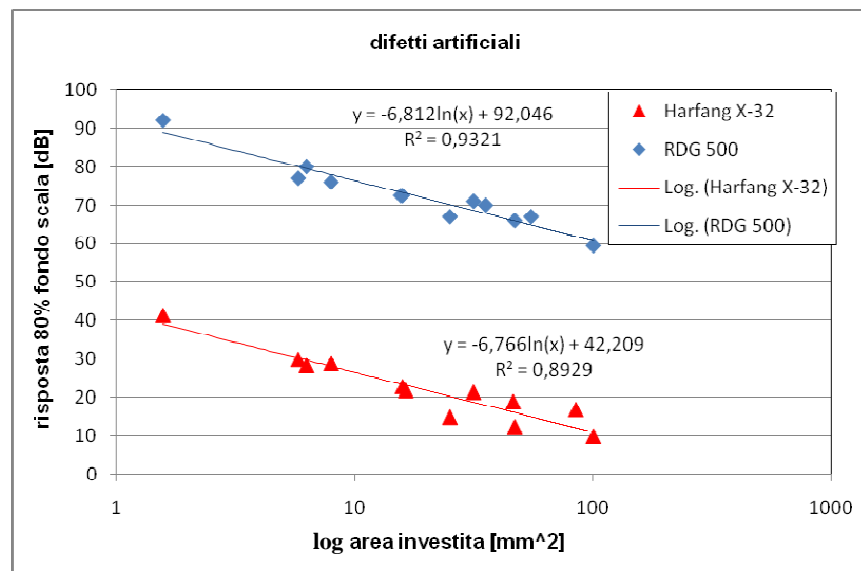


Fig. 2.19 risposte UT in funzione dell'area investita in scala logaritmica

Si può notare come i coefficienti angolari delle due rette siano pressoché uguali, i valori del coefficiente di determinazione R^2 prossimi all'unità indicano una buona interpolazione anche se esiste una differenza in termini di valori assoluti riconducibile alla diversa tecnologia realizzativa dei due strumenti.

2.5 Difetti artificiali 1° percorso

Questo tipo di analisi viene effettuata posizionando la sonda non più all'esterno del pezzo ma all'interno, si ricercheranno quindi i difetti facendo compiere al fascio un percorso diretto senza riflessioni (fig.2.20, 2.21).

Per eseguire questo tipo di controllo si sono dovuti tagliare a metà i due blocchi campione consentendo libero accesso alla superficie interna su cui far scorrere la sonda con apposito zoccolo.

Le risposte ottenute verranno relazionate sia con la dimensione caratteristica sia con l'area investita dal fascio per ogni difetto. Anche per questa sonda si

calcolano prima le dimensioni del fascio poi per le aree si seguono gli stessi ragionamenti descritti precedentemente.

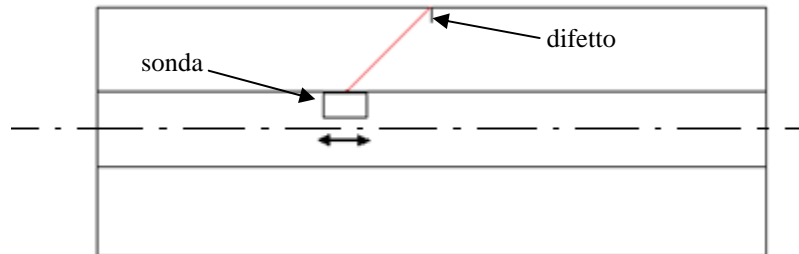


Fig. 2.20 schema ispezione dall'interno



Fig. 2.21 controllo difetti in primo percorso

2.5.1 Dati acquisiti Gilardoni RDG 500

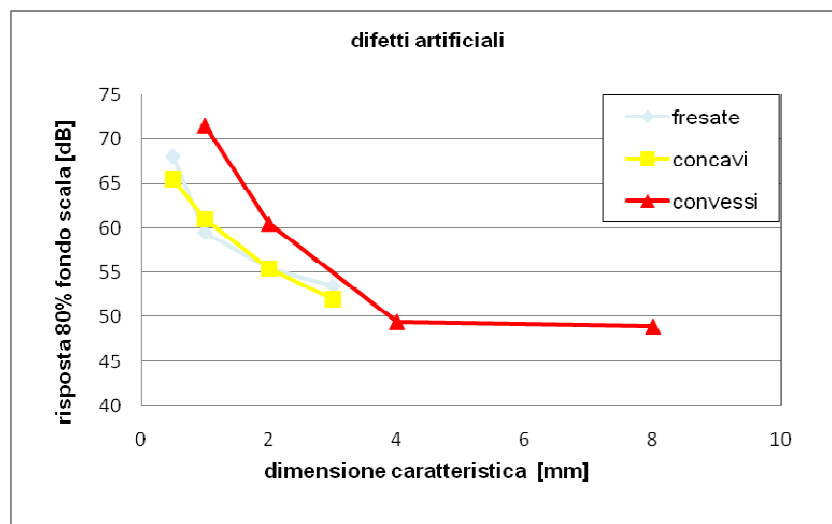
Di seguito si riportano i dati relativi alle prove sopra descritte.

Come prima cosa si calcolano le dimensioni del fascio (tab. 2.6) relative ad un percorso diretto (che coincide con la metà del percorso utilizzato per le ispezioni con riflessione sul foro barenò):

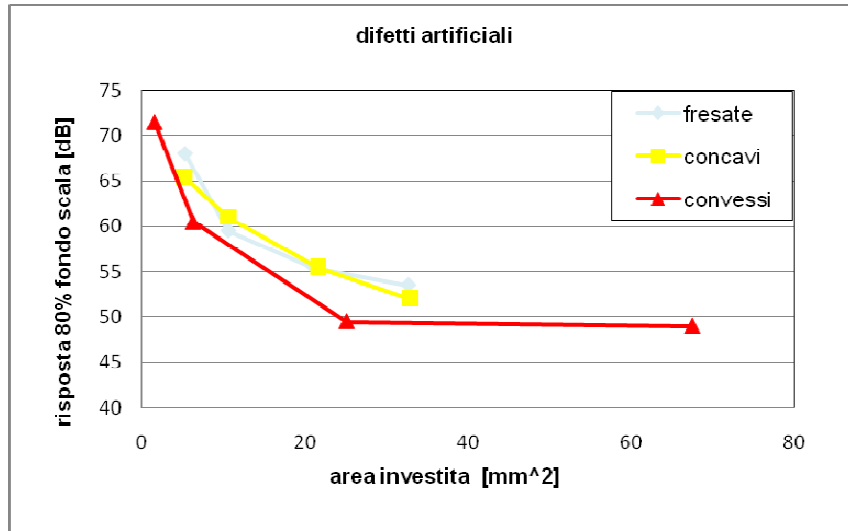
<i>Sonda ATM45-4</i>	<i>45° (0,785 radianti)</i>
<i>Larghezza cristallo (L)</i>	9 mm
<i>Altezza cristallo (H)</i>	8 mm
<i>Frequenza (f)</i>	4000000 Hz
<i>Velocità trasversale (Vt)</i>	3230 m/s
<i>K_alfa (fattore da tab.)</i>	0,91
<i>Percorso teorico (p)</i>	64,5 mm
<i>Lunghezza d'onda (λ)</i>	0,0008075 m
<i>Semilarghezza fascio (b1)</i>	5,2662 mm
<i>Semialtezza fascio (b2)</i>	5,9245 mm

Tab.2.6 caratteristiche fascio ultrasonoro sonda ATM45-4

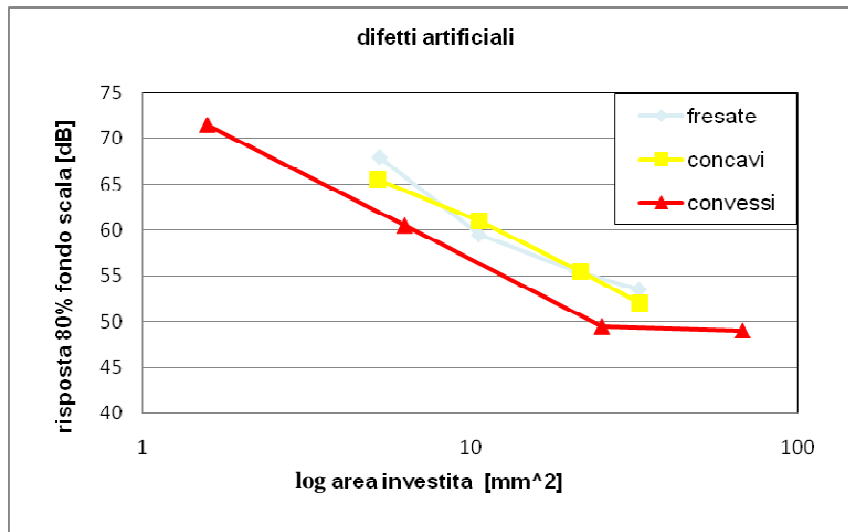
Come già evidenziato in precedenza per le ispezioni eseguite in secondo percorso anche in questo caso otteniamo gli stessi risultati (fig 2.22a,b,c) con la sola eccezione del livello delle risposte in decibel che sono molto più basse questo è dovuto al fatto che si ha minor dispersione del fascio all'interno del materiale in quanto il percorso effettuato non compie rimbalzi e arriva direttamente ad individuare il difetto.



(a)



(b)



(c)

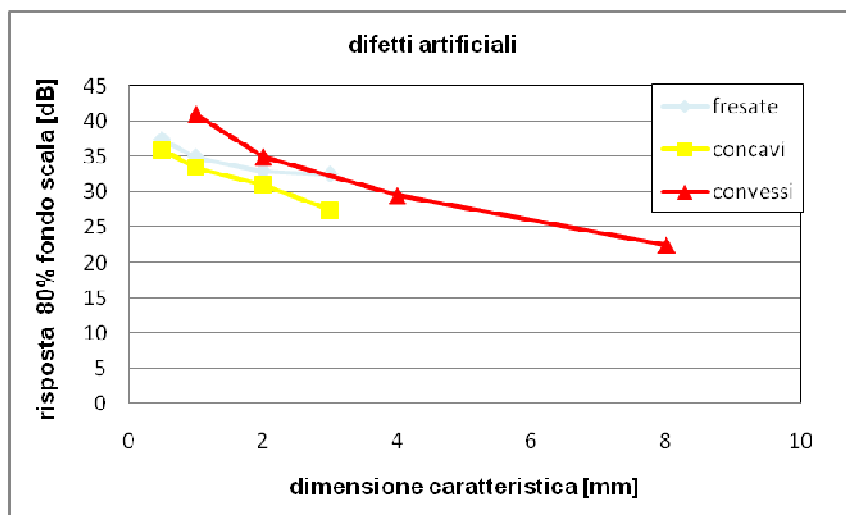
Fig. 2.22 Risposte UT difetti artificiali con RDG 500 (ispezione in primo percorso) in funzione della profondità (a), dell'area investita (b) e in scala semi logaritmica (c)

2.5.2 Dati acquisiti Harfang X-32

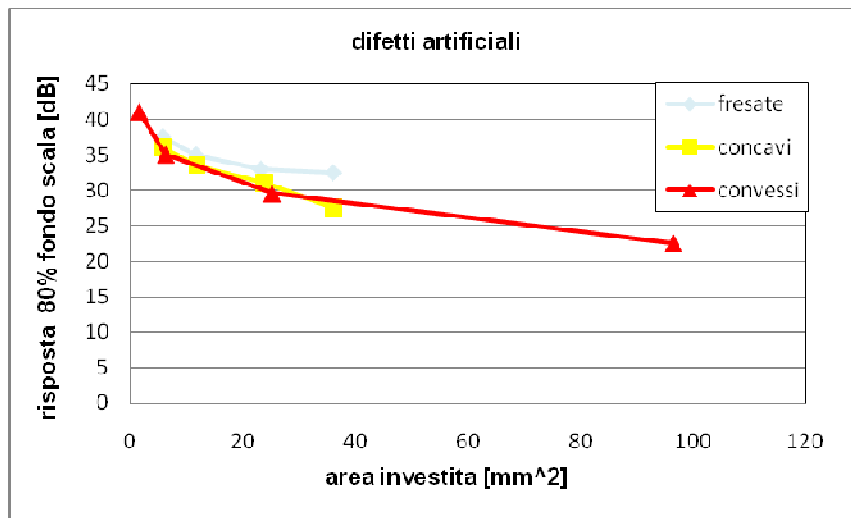
Sonda Phased array 32 cristalli

<i>Sonda phased array</i>	<i>32 cristalli</i>
<i>Passo</i>	0,8 mm
<i>Inclinazione singolo cristallo</i>	45° (0,785 radianti)
<i>Larghezza singolo cristallo (L)</i>	12 mm
<i>Altezza singolo cristallo (H)</i>	0,762 mm
<i>Frequenza (f)</i>	5000000 Hz
<i>Velocità longitudinale (Vl)</i>	5920 m/s
<i>K_alfa (fattore da tab.)</i>	0,91
<i>Percorso teorico (p)</i>	123,04 mm
<i>Lunghezza d'onda (λ)</i>	0,001184 m
<i>Semilarghezza fascio (b1)</i>	5,79124 mm
<i>Semialtezza fascio (b2)</i>	91,2006 mm

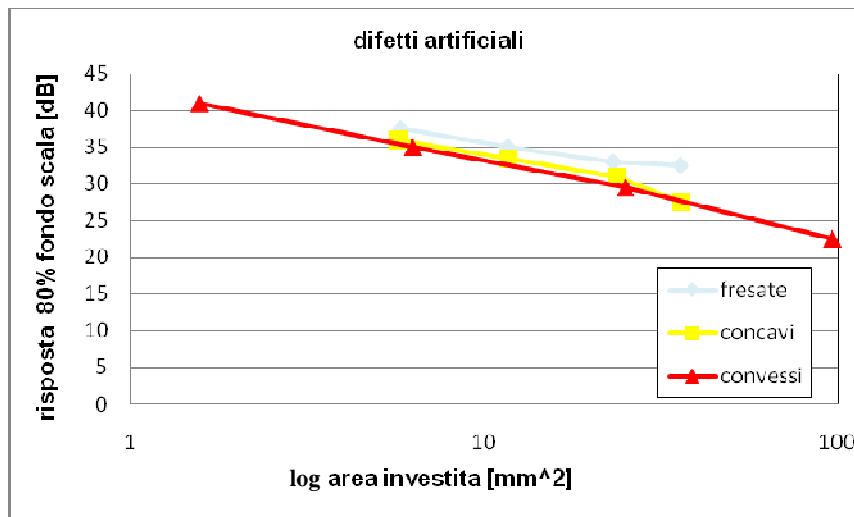
Tab. 2.7 caratteristiche fascio ultrasonoro sonda phased array



(a)



(b)



(c)

Fig.2.23 Risposte UT difetti artificiali con Harfang X-32 (ispezione in primo percorso) in funzione della profondità (a), dell'area investita (b) e in scala semi logaritmica (c)

Si ottengono gli stessi risultati (fig.2.23a,b,c) anche con questa strumentazione sebbene dal diagramma semi logaritmico (fig.2.24) troviamo una differenza tra i coefficienti angolari delle rette interpolanti e una miglior linearità delle risposte acquisite con la centralina Gilardoni.

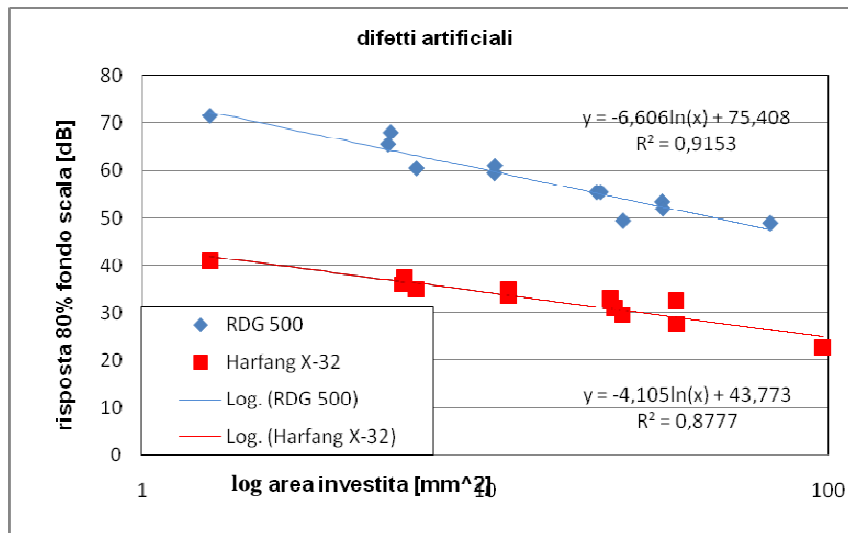


Fig. 2.24 risposte UT (primo percorso) in funzione dell'area investita in scala logaritmica

2.6 Nuovi difetti artificiali

In questo paragrafo si trovano i dati relativi alle ispezioni ultrasonore effettuate su due nuovi pezzi campione che sono ovviamente dello stesso materiale, dimensioni e finitura superficiale di quelli analizzati precedentemente (vedi paragrafo 2.5) e presentano sulla superficie esterna otto diversi intagli di forma e dimensioni evidenziate nelle figure sottostanti (fig. 2.26, 2.27).

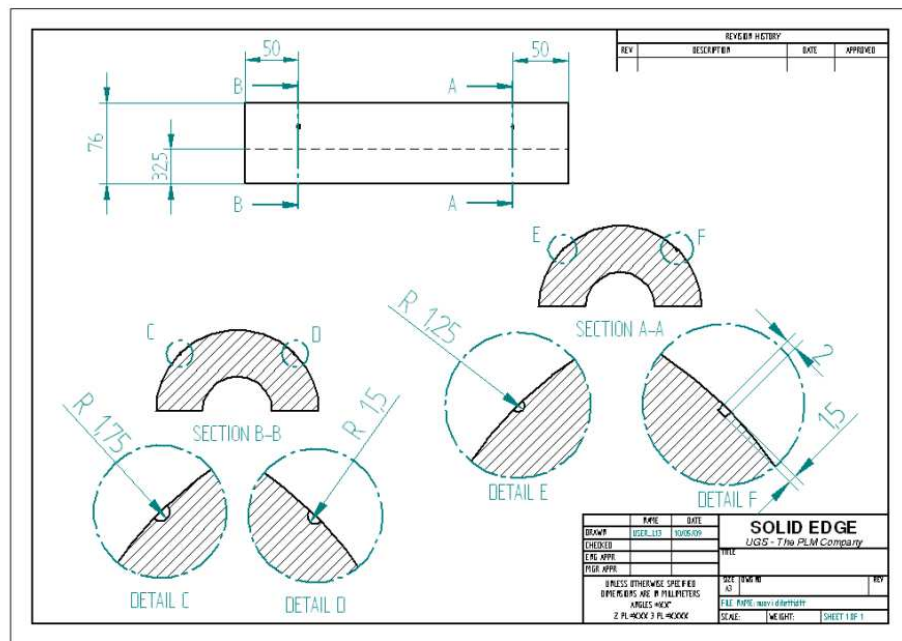


Fig. 2.26 pezzo campione n°1 con intagli

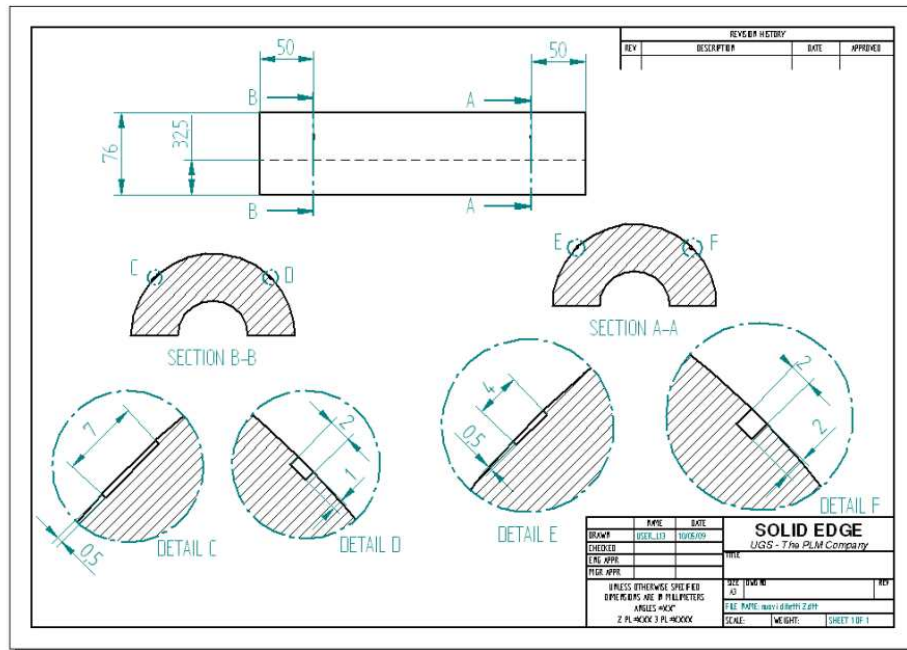


Fig. 2.27 pezzo campione n°2 con intagli

Lo scopo di queste analisi è quello di avere a disposizione una maggior quantità di dati, necessari a infittire le curve (risposta-dimensione/area) soprattutto nella zona iniziale ovvero quella riguardante i difetti “piccoli” dove si ha una carenza di punti.

Le ispezioni saranno eseguite con le stesse modalità descritte per gli altri difetti artificiali, in primo e secondo percorso con entrambe le strumentazioni.

2.6.1 Dati acquisiti Gilardoni RDG 500

Analisi in primo percorso

Nella tabella 2.8 sono riassunte le dimensioni e le risposte ultrasonore relative ai nuovi difetti artificiali ispezionati con il rilevatore Gilardoni RDG 500 con sonda ATM45-4. In questo caso il calcolo delle aree risulta semplificato in quanto le dimensioni dei difetti sono sempre inferiori a quelle del fascio che li investe (si seguono gli stessi ragionamenti adottati per i difetti analizzati in precedenza).

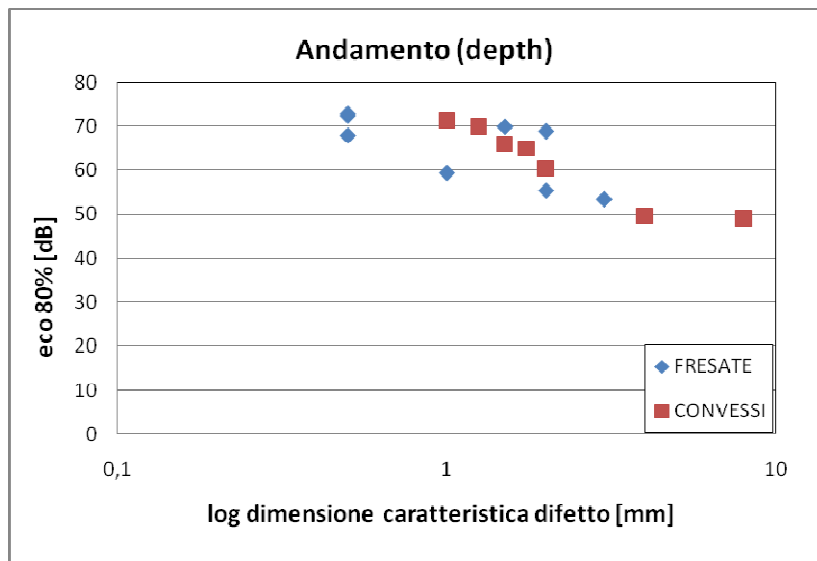
I commenti saranno effettuati osservando i grafici che mostrano l'andamento delle risposte in funzione della dimensione caratteristica e dell'area investita dei difetti “nuovi” insieme ai primi analizzati appartenenti alla stessa categoria.

FRESATE			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
2	2	69	4
1,5	2	70	3
1	2	71,5	2
0,5	7	72,5	3,5
0,5	4	73	2
CONVESSI			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
1,75	3,5	65	4,81056375
1,5	3	66	3,53429174
1,25	2,5	70	2,45436926

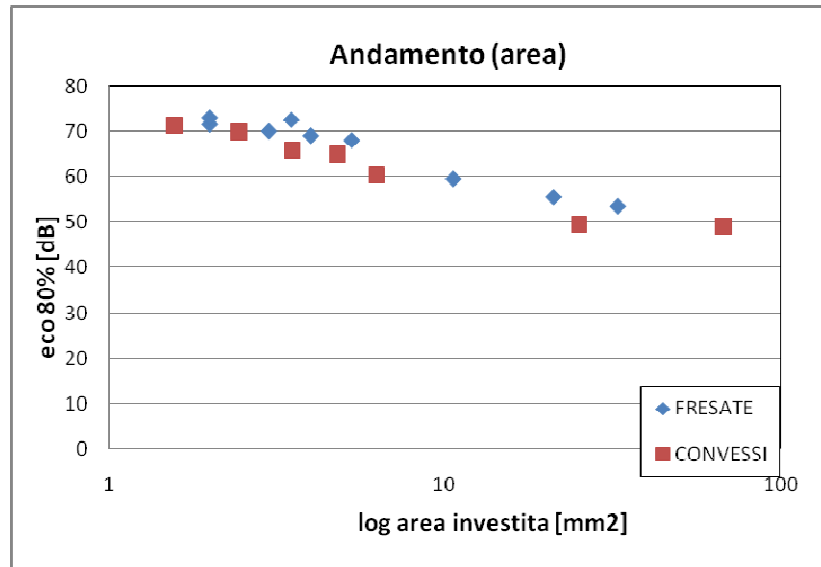
Tab 2.8 risposte UT nuovi difetti (1° percorso)

Evidente come anche in questo caso l'andamento delle risposte in funzione della dimensione caratteristica mostri una certa dipendenza dalla geometria del difetto (fig. 2.28a), dipendenza che sparisce se relazioniamo le risposte all'area investita dal fascio (fig. 2.28b)

Interessante invece osservare come le risposte dei nuovi difetti in funzione dell'area investita (in scala logaritmica) si dispongano in modo lineare secondo quanto ci si aspettava ovvero descrivano la parte iniziale della curva.



(a)



(b)

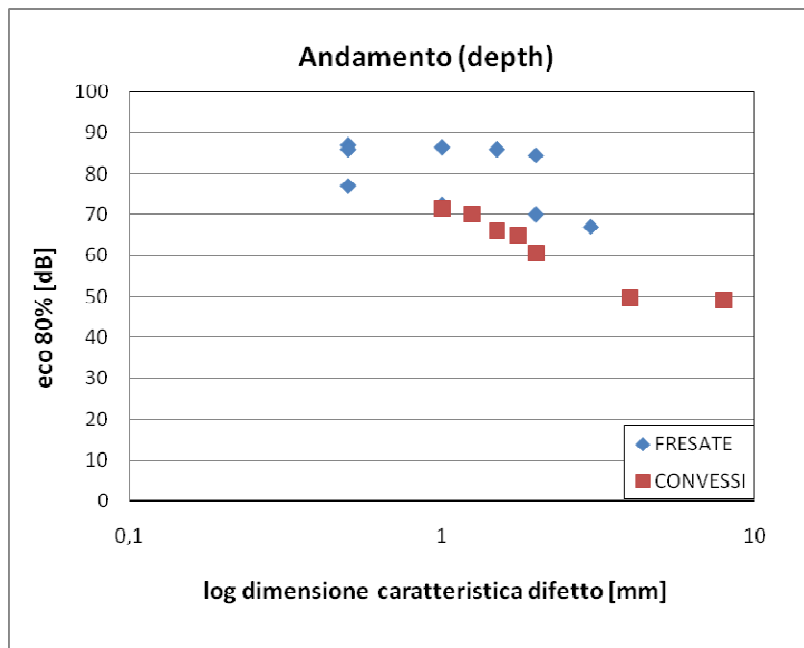
Fig. 2.28 risposte difetti artificiali (primo percorso) in funzione della profondità (a) e dell'area investita dal fascio (b)

Analisi in secondo percorso

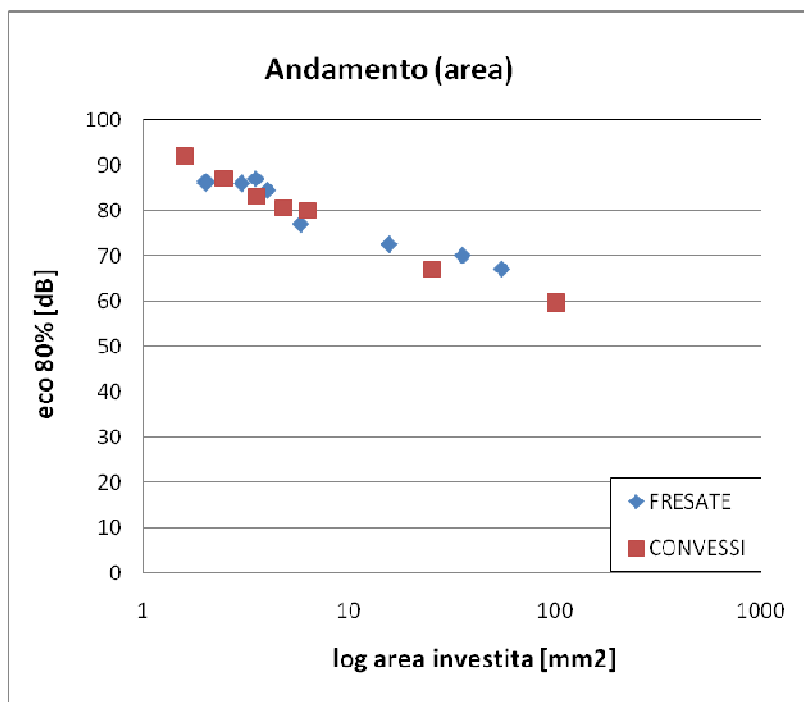
FRESATE			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
2	2	84,5	4
1,5	2	86	3
1	2	86,5	2
0,5	7	87	3,5
0,5	4	86	2
CONVESSI			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
1,75	3,5	80,5	4,810563751
1,5	3	83	3,534291735
1,25	2,5	87	2,454369261

Tab. 2.9 risposte UT nuovi difetti (2° percorso)

Anche dall'ispezione ultrasonora eseguita in secondo percorso otteniamo sempre gli stessi andamenti ricavati in precedenza (ispezioni in primo percorso) come si mostra nelle figure 2.30a,b.



(a)



(b)

Fig. 2.30 risposte difetti artificiali (secondo percorso) in funzione della profondità (a) e dell' area investita dal fascio (b).

2.6.2 Dati acquisiti Harfang X-32

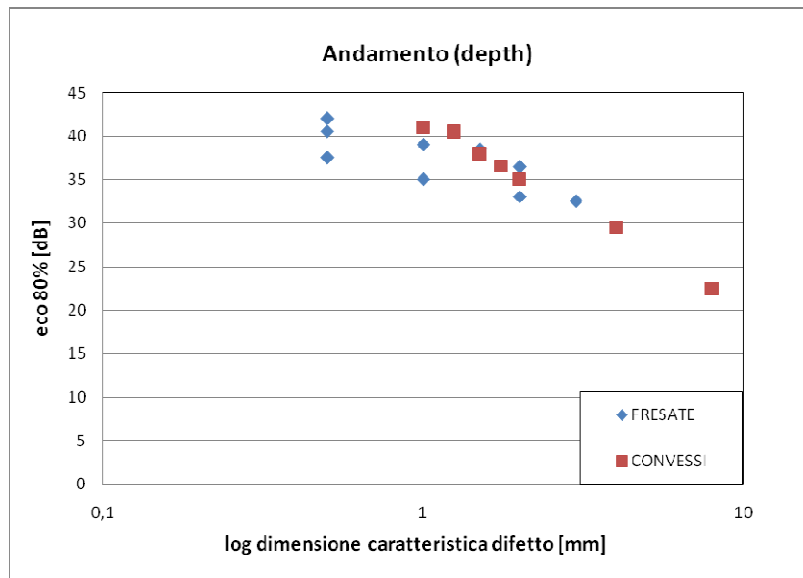
Analisi in primo percorso

A conferma dei risultati ottenuti con il rilevatore Gilardoni si utilizza la seconda strumentazione equipaggiata con la sonda phased array a 32 cristalli.

Gli andamenti delle risposte sono pressoché gli stessi ricavati prima come si può ben notare dai grafici di figura 2.32a,b.

FRESATE NUOVE			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
2	2	36,5	4
1,5	2	38,5	3
1	2	39	2
0,5	7	40,5	3,5
0,5	4	42	2
CONVESSI NUOVI			
profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	area [mm ²]
1,75	3,5	36,5	4,810563751
1,5	3	38	3,534291735
1,25	2,5	40,5	2,454369261

Tab. 2.10 risposte UT nuovi difetti (1° percorso)



(a)

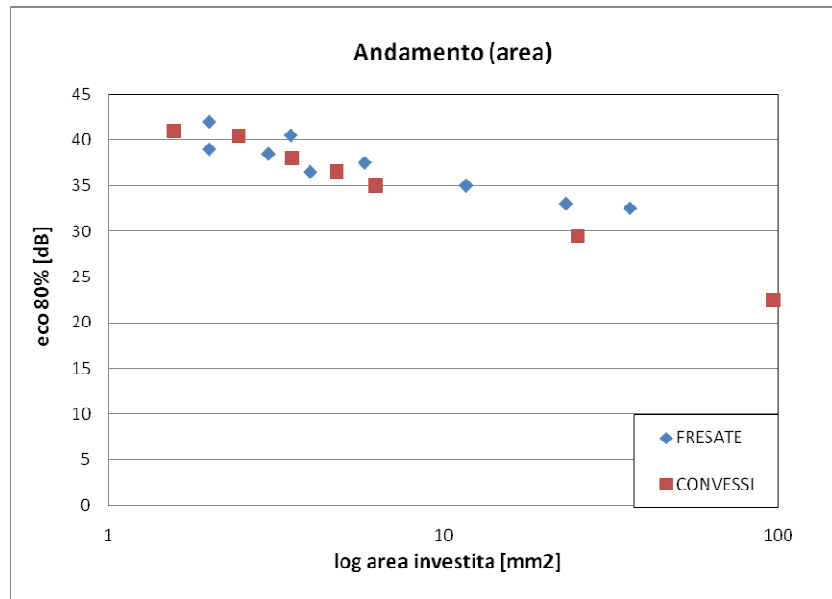
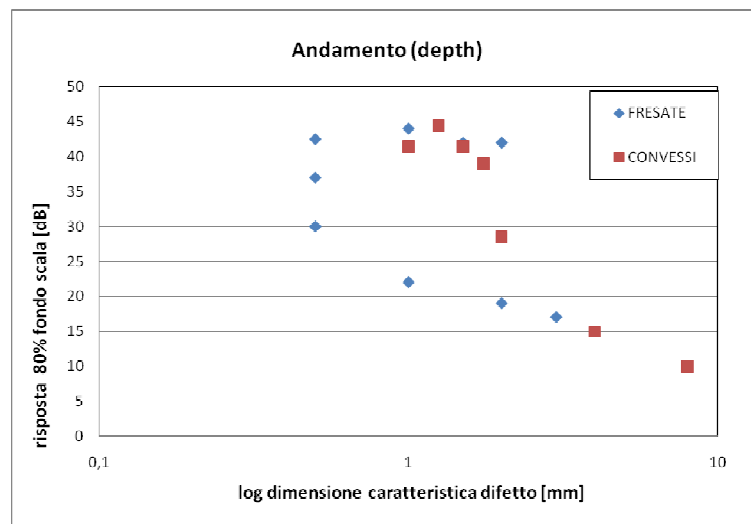


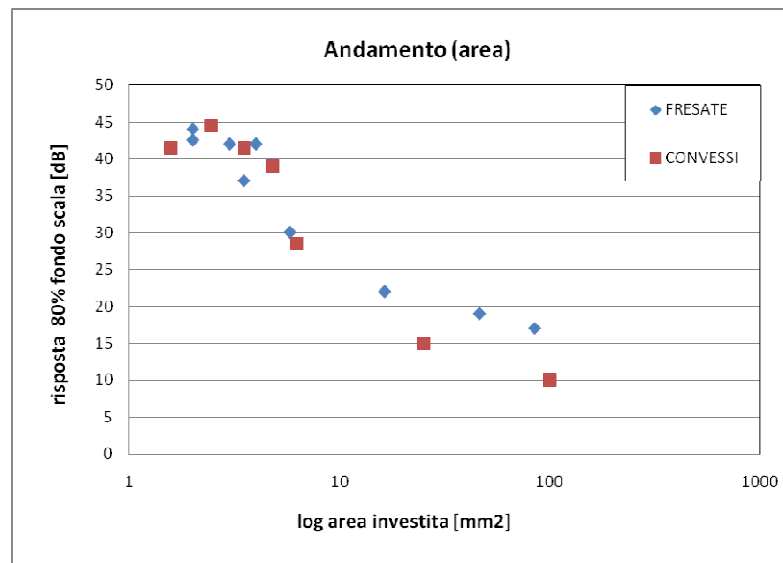
Fig. 2.32 risposte difetti artificiali (primo percorso) in funzione della profondità (a) e dell' area investita dal fascio (b)

Analisi in secondo percorso

Come per le acquisizioni eseguite con il rilevatore RDG 500 anche la seconda strumentazione sembra seguire l'andamento generale delle risposte anche nel caso di analisi in secondo percorso (fig. 2.34a,b).



(a)



(b)

Fig. 2.34 risposte difetti artificiali (secondo percorso), in funzione della profondità (a) e dell' area investita dal fascio (b)

2.7 Difetti artificiali realizzati su assile criccato

In questo paragrafo si trovano i dati provenienti dalle ispezioni ultrasonore relative ad un ulteriore set di difetti artificiali realizzati su un assile full scale di proprietà dell'azienda Lucchini RS S.p.A. (fig. 2.35).

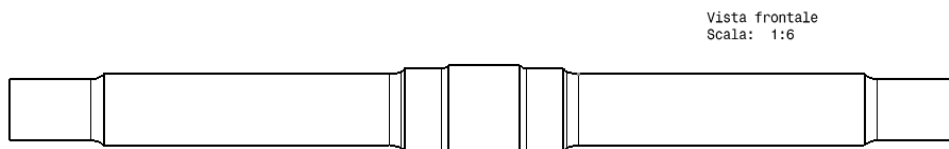


Fig. 2.35 assile 018

L'assile in questione essendo precedentemente sottoposto ad una prova di propagazione al banco dinamico (nel capitolo 3 si darà ampio spazio alla descrizione di questa prova) presenta una cricca nella zona di raccordo tra il corpo e la prima portata mentre gli intagli eseguiti mediante elettroerosione sono come al solito di forma semicircolare (intagli convessi) e rettangolare (fresate), quelli realizzati sul corpo e sulla portata sono diritti (fig. 2.36) mentre in corrispondenza della sezione criccata dell' assile sono appositamente inclinati di

circa 5 gradi (angolo che forma la normale con la superficie di raccordo) (fig. 2.37).

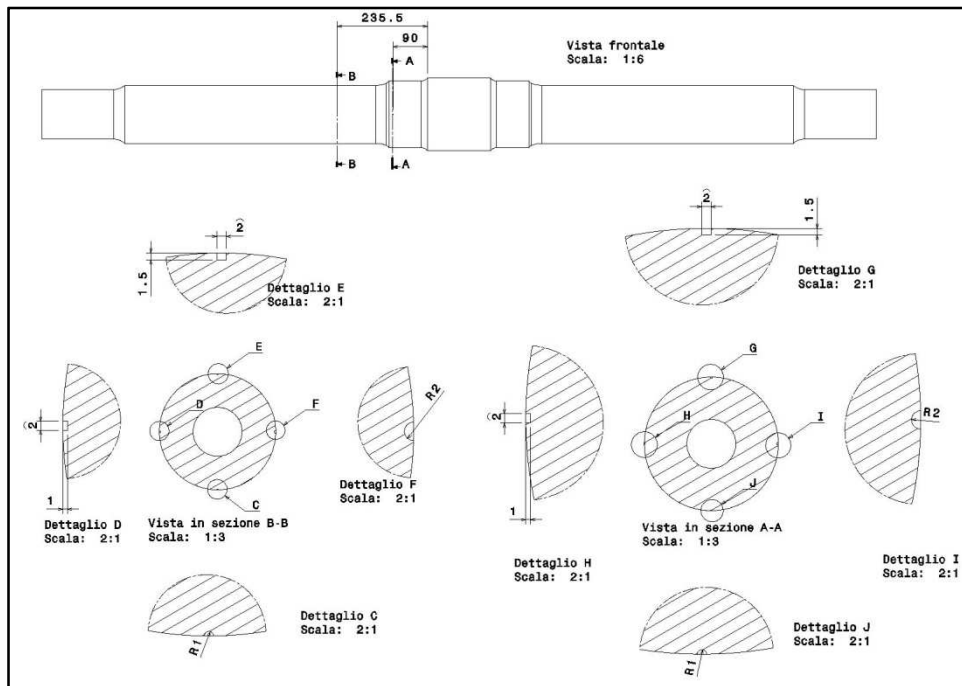


Fig. 2. 36 difetti dritti realizzati sul corpo e portata

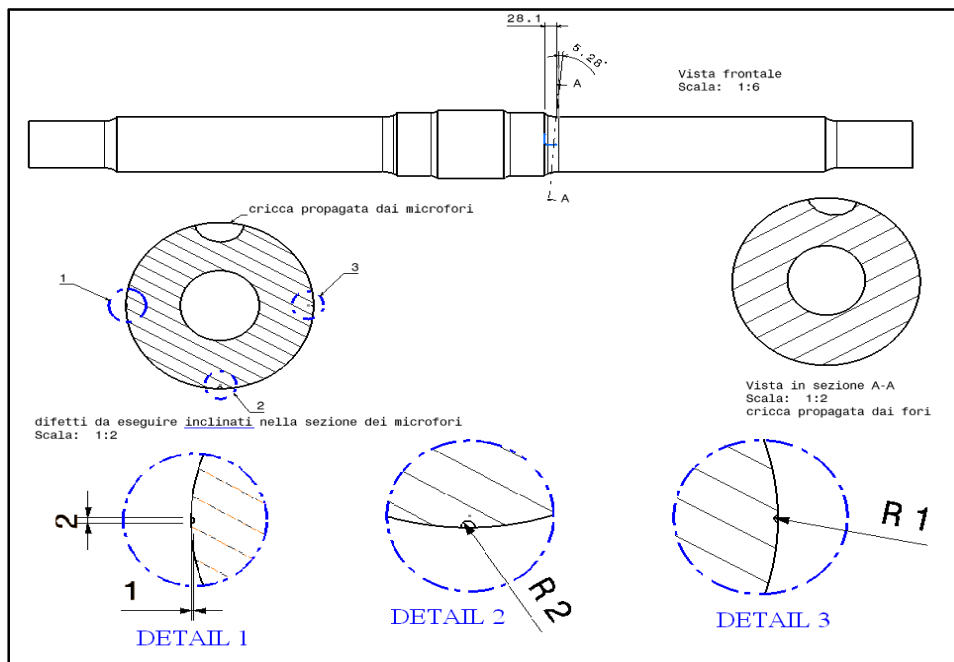


Fig. 2. 37 difetti inclinati realizzati in corrispondenza della sezione criccata

Le ispezioni si effettuano in modalità secondo percorso con il rilevatore ultrasonoro Gilardoni RDG 500 abbinato alla sonda ATM 45-4. Nella seguente tabella (tab. 2.11) si riportano per ogni difetto le risposte in decibel e le aree investite dal fascio.

FRESATE diritte	profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	2° percorso [mm]	area [mm ²]
E(corpo)	1,5	2	86,5	128,99	3
D(corpo)	1	2	88,5	126,65	2
G(portata)	1,5	2	88,5	142,9	3
H(portata)	1	2	91	143,64	2

CONVESSI diritti	profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	2° percorso [mm]	area [mm ²]
C(corpo)	1	2	91	127,52	1,570796327
F(corpo)	2	4	80,5	128,1	6,283185307
J(portata)	1	2	92,5	143,7	1,570796327
I(portata)	2	4	81	143,49	6,283185307

FRESATE inclinate	profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	2° percorso [mm]	area [mm ²]
1(transizione)	1	2	92,5	127,4	2

CONVESSI inclinati	profondità [mm]	largh. [mm]	eco (80%) [dB]	2° percorso [mm]	area [mm ²]
2(transizione)	2	4	80,5	128	6,283185307
3(transizione)	1	2	94	128,21	1,570796327

Tab. 2.11

Raggruppando per categoria (fresate e convessi) la totalità dei difetti analizzati si nota, graficando la risposta ultrasonora in funzione dell' area investita dal fascio l'atteso andamento lineare (fig. 2.38) in conformità con i risultati ottenuti precedentemente.

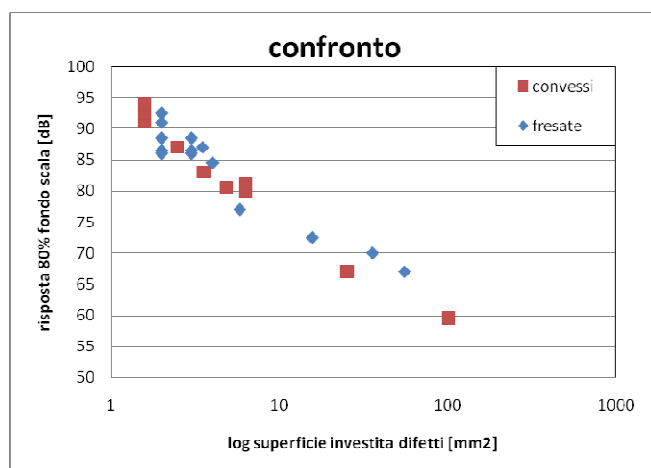


Fig. 2.38

Analizzando in dettaglio le risposte dei difetti realizzati sull'assile separatamente da quelle relative ai blocchi campione si possono identificare alcuni aspetti comuni che influenzano le risposte ultrasonore (fig. 2.39 e 2.40): innanzitutto l'energia sonora, ovvero i decibel, per individuare i difetti decresce a seconda della posizione che essi occupano quindi i difetti inclinati (sia la fresata da 2 mm^2 che il convesso di raggio 1 mm) situati sulla superficie raccordata richiedono la maggior energia seguiti poi da quelli realizzati sulla portata (avendo un diametro maggiore rispetto al corpo assile il percorso del fascio ultrasonoro sarà maggiore) e infine da quelli sul corpo ai quali si affiancano quelli relativi ai blocchi campione (percorsi pressoché simili). Questa differenza in termini di decibel risulta diminuire all'aumentare dell'area investita dal fascio infatti si nota per entrambe le categorie di difetto ma più marcatamente per i convessi un avvicinamento dei valori di risposta (fig. 2.39 e 2.40)

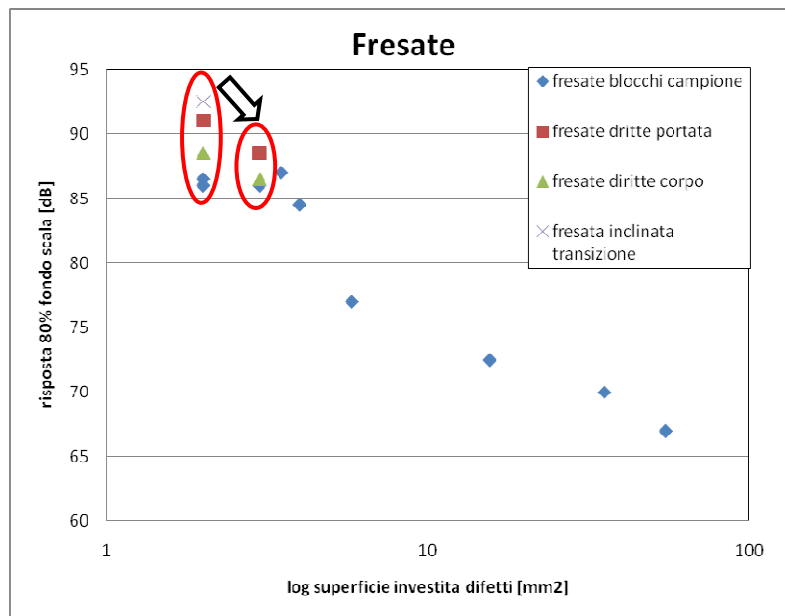


Fig. 2.39

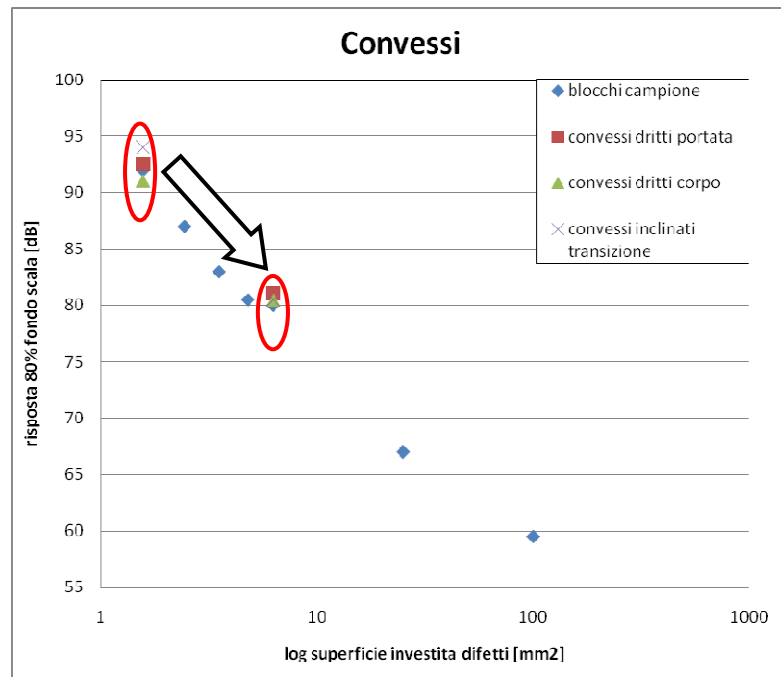


Fig. 2.40

Capitolo 3

Analisi ultrasonora di cricche naturali di fatica: controlli di individuazione

Finora ci siamo occupati di ispezionare e analizzare difetti artificiali presenti in pezzi campione, in questo paragrafo vediamo effettivamente cosa succede nella realtà quando gli assili entrano in esercizio. Sappiamo bene che essi sono tipicamente soggetti a carichi di fatica ed è quindi possibile che nucleino e propaghino cricche nelle zone maggiormente sollecitate o in corrispondenza di difetti derivanti da lavorazioni tecnologiche.

Ci occuperemo di tre assili di differente geometria su cui eseguire le prove di propagazione e dalle quali ricaveremo i dati riguardanti le risposte UT delle cricche formatesi. Per far questo ci serviremo quindi di un banco dinamico [16] (fig. 3.1) per la prova di propagazione, un sistema telecamera-microscopio (fig 3.2) per il monitoraggio dell'avanzamento superficiale della cricca e della solita attrezzatura per il controllo ultrasonoro.



Fig 3.1 banco dinamico



Fig 3.2 sistema telecamera-microscopio

3.1 Prova di propagazione full-scale

Nell'ottica di ottenere le risposte ultrasonore di cricche naturali di fatica sono state eseguite tre prove di propagazione full-scale su assili cavi mediante il banco dinamico assili situato presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. La prova in questione non è altro che una normale prova di fatica (flessione rotante su tre punti) con la presenza di un intaglio (innesco della frattura) che descriveremo meglio in seguito. Questo tipo di prova prevede alcune fasi preliminari da eseguire prima del montaggio dell'assile sul banco dinamico: innanzitutto si procede con le operazioni di misurazione dei diametri rispettivamente della portata di calettamento, del corpo e del foro barenò poi si passa al calettamento del cuscinetto centrale (fig. 3.3) e all'incollaggio in determinate posizioni dell'assile di alcuni estensimetri (fig. 3.4) che verranno successivamente collegati ad un'apposita centralina dopo aver posizionato l'assile sul banco.



Fig.3.3 calettamento cuscinetto centrale



Fig.3.4 applicazione estensimetri

Il compito degli estensimetri sarà in un primo momento quello di verificare, attraverso la lettura delle deformazioni senza applicazione di

carichi, se l' assile è ben posizionato (i tre punti su cui poggia l' assile devono essere ben allineati per una buona riuscita della prova). Una volta concluse le fasi preliminari l'assile risulta vincolato al telaio del banco in corrispondenza dei fuselli laterali per mezzo di normali boccole (fig 3.5) ed in corrispondenza della portata centrale attraverso un cuscinetto connesso a sua volta ad un attuatore (fig.3.6), si passa quindi all'esecuzione della prova statica applicando un carico di 100 KN così da definire il legame tra il carico applicato e lo sforzo agente (mediante le letture estensimetriche si determina il K_t per individuare la sezione maggiormente sollecitata). Il carico applicato genera in questo modo un momento flettente tale da fornire nella zona denominata transizione (fig.3.7) lo sforzo massimo, per questo motivo l'innescò della frattura (ovvero i microfori) dovrebbe eseguirsi possibilmente su questa superficie.



Fig. 3.5 boccola



Fig. 3.6. attuatore

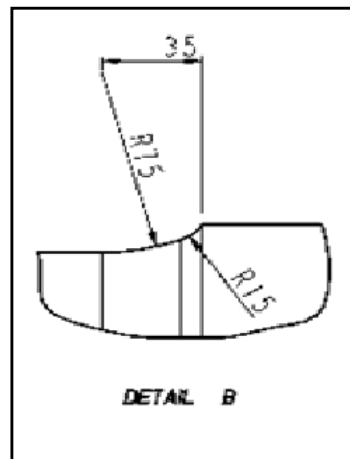


Fig. 3.7 transizione

L'ultima operazione prima della vera e propria prova di fatica consiste nel montare un sistema telecamera-microscopio (fig. 3.8) sopra l'assile, essa è

collegata ad un calcolatore e mediante un software dedicato siamo in grado di acquisire le immagini dell'evoluzione della cricca con la possibilità di misurarne la lunghezza.

A questo punto si sceglie il carico, la velocità di rotazione e il numero di cicli a cui fermare ogni volta la prova e si procede con la prova di propagazione, quando si nota l'inizio della formazione della cricca da una parte o da entrambe le parti dei microfori si effettua il controllo ultrasonoro. Si procede così fino alla lunghezza di cricca desiderata.

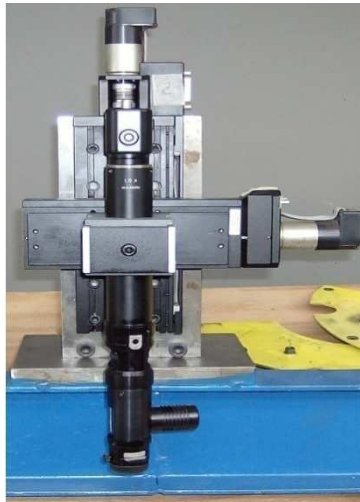


Fig. 3.8 telecamera-microscopio

3.1.1 Assile 014

Il primo dei due assili proposti è prodotto in acciaio A4T ed è cavo con diametro del corpo pari a 152 mm e portata 175 mm (fig. 3.9). L'innesco della frattura è realizzato sul corpo assile (la zona di transizione è inaccessibile perché si trova all'interno del monoblocco centrale) ad una distanza predefinita dalla battuta del cuscinetto centrale montato sulla portata ed è costituito da una serie di microfori (fig. 3.10), in questo caso cinque di cui quello centrale di diametro 1 mm e quelli laterali 0,6 mm, realizzati con un'apposita fresa.

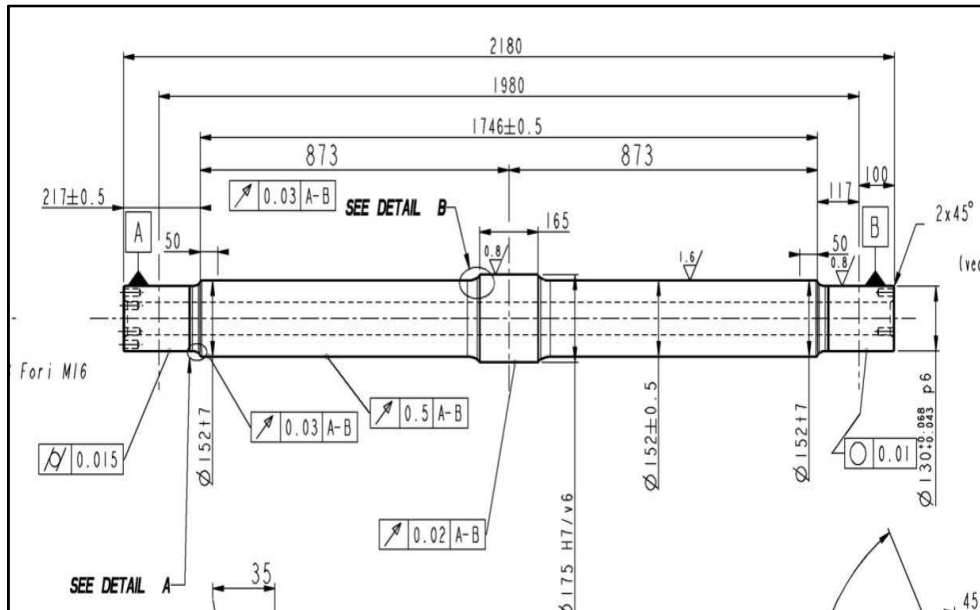


Fig.3.9 assile 14

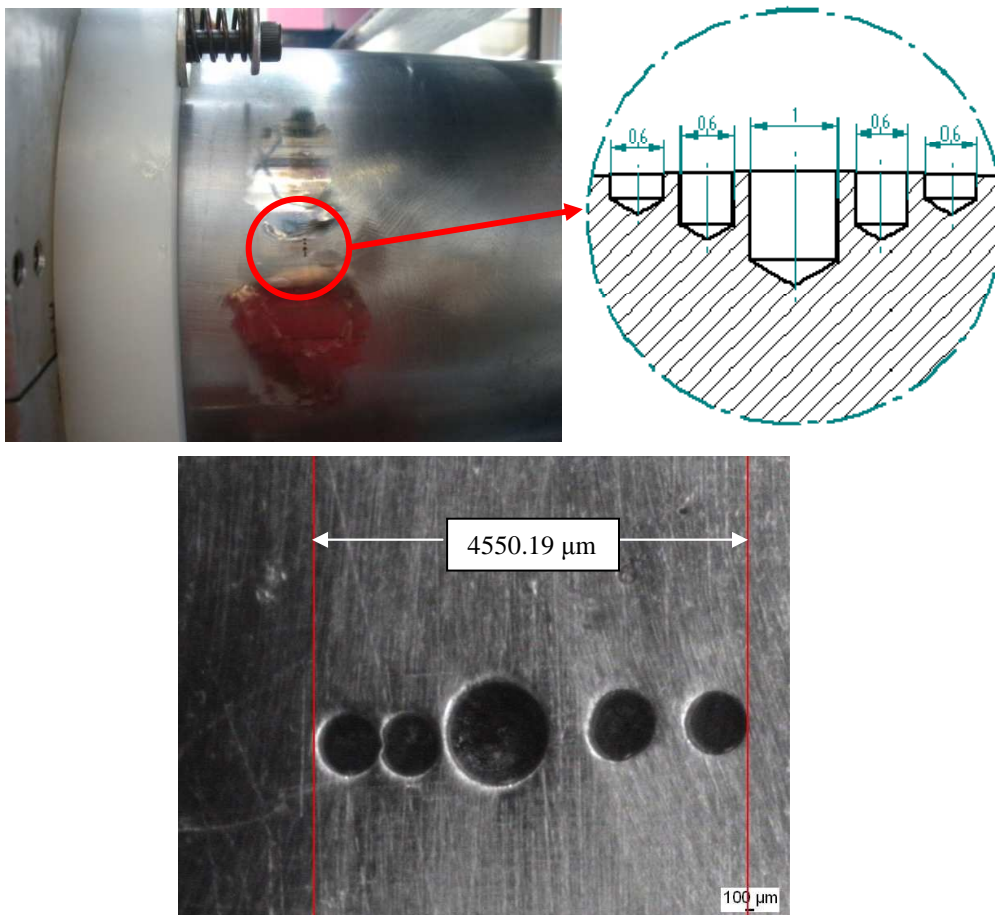


Fig.3.10 microfori artificiali

Mediante le equazioni elencate di seguito (eq. 3.1) si determina lo sforzo nella sezione del difetto per risalire al carico da utilizzare nella prova:

Materiale	A4T
F statico applicato [kN]	132
l [mm]	1980,52
braccio difetto [mm]	808,51
d esterno [mm]	152,24
d interno [mm]	64,84

$$M_{f_{difetto}} = \frac{F_{statico} \cdot 1000}{2} \cdot b_{difetto} = 53361660 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (3.1)$$

$$J = \pi \cdot \frac{(d_{esterno}^4 - d_{interno}^4)}{64} = 25500829,46 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{difetto} = \frac{M_{f_{difetto}} \cdot d_{esterno}}{J \cdot 2} = 159,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{difetto \text{ impostato per la prova}} = 175 \text{ MPa}$$

$$\text{carico risultante} = \frac{(\sigma_{difetto \text{ impostato per la prova}} \cdot J \cdot 4)}{d_{esterno} \cdot b_{difetto} \cdot 1000} = 145,02 \text{ KN}$$

L'avanzamento superficiale della cricca viene monitorato con il sistema telecamera, nelle seguenti immagini si può vedere il propagarsi della cricca prima dalla parte sinistra dei microfori (fig. 3.11) poi dall'altra parte (fig. 3.12).

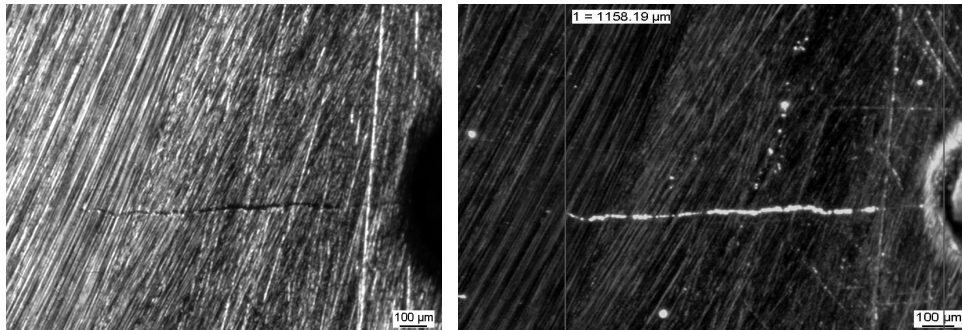


Fig. 3.11 avanzamento cricca parte sinistra

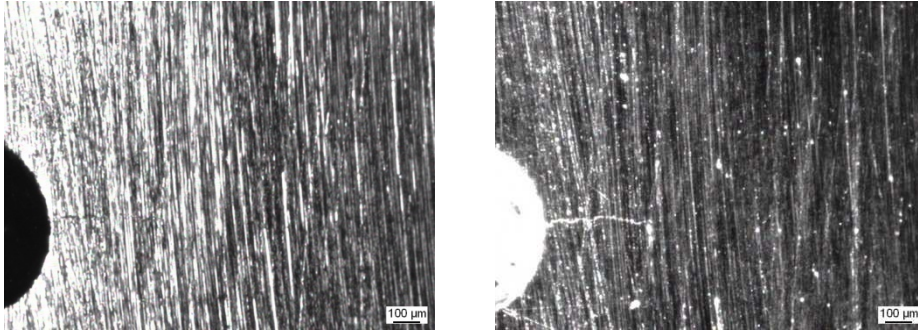


Fig. 3.12 avanzamento cricca lato destro

Mediante il software di acquisizione delle immagini si riesce a misurare la lunghezza superficiale della cricca prendendo come riferimento le estremità dei fori fin quando possibile poi si utilizzeranno dei riferimenti creati appositamente da noi (segni trasversali alla cricca) (fig. 3.13, 3.14).

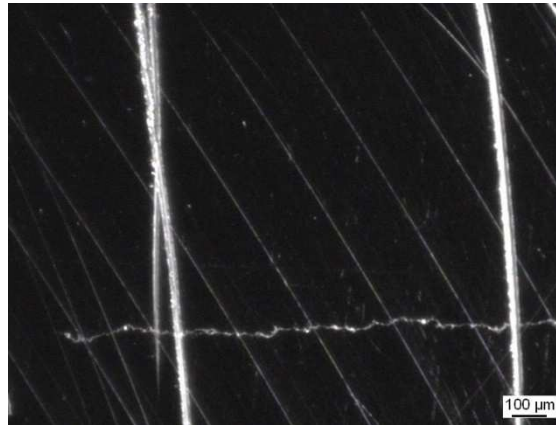


Fig. 3.13 riferimenti lato sinistro per la misurazione

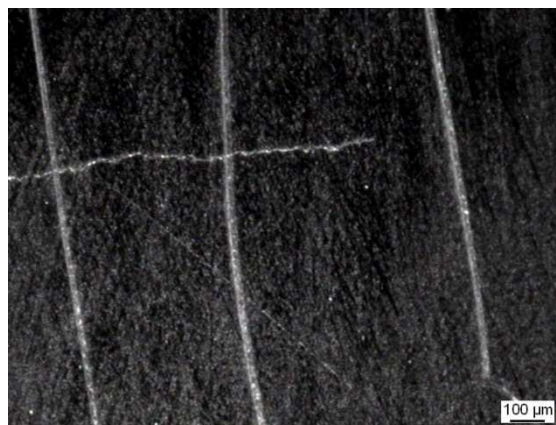


Fig. 3.14 riferimenti lato destro per la misurazione

Tali lunghezze misurate (2L) si inseriscono nelle formule per il calcolo della profondità della cricca “a” (vedi eq. 3.2), essa viene stimata sfruttando l’ ipotesi che la cricca di fatica sia di forma semi-ellittica.

$$a = r(1 + \tan\theta - \sec\theta) \quad (3.2)$$

$$\theta = \frac{2L}{d}$$

Dove r e d sono rispettivamente il raggio e il diametro esterno del corpo assile. La seguente tabella (tab 3.1) riassume gli step in cui si ferma la prova e si misura la lunghezza di cricca propagata, mentre nei grafici di figura 3.15 si mostra l’andamento della lunghezza (2L) e della profondità (a) della cricca in funzione del numero di cicli (N).

Carico [kN]	Sforzo [MPa]	N [cicli]	notch [micron]	L dx [micron]	ΔL dx [micron]	L sx [micron]	ΔL sx [micron]	2L [micron]
0	0	0	4550,19	0	0	0	0	4550,19
120,00	140,00	700851	4550,19	0	0	0	0	4550,19
138,00	160,00	831039	4550,19	0	0	0	0	4550,19
138,00	160,00	1535700	4550,19	0	0	96,92	96,92	4647,11
138,00	160,00	1736237	4550,19	0	0	230,19	133,27	4780,38
145,00	175,00	3728169	4550,19	0	0	281,38	0	4831,57
145,00	175,00	3840036	4550,19	45,99	45,99	855,05	573,67	5451,23
145,00	175,00	3940132	4550,19	45,99	0	1156	300,95	5752,18
145,00	175,00	4040046	4550,19	45,99	0	1521,95	365,95	6118,13
145,00	175,00	4190072	4550,19	45,99	0	2395,82	873,87	6992,00
145,00	175,00	4290108	4550,19	365,85	319,86	3765,16	1369,34	8681,20
145,00	175,00	4340027	4550,19	1434,15	1068,3	4816,73	1051,57	10801,07
145,00	175,00	4390056	4550,19	3119,17	1685,02	6485,02	1668,29	14154,38
145,00	175,00	4425125	4550,19	5119,86	2000,69	8423	1937,98	18093,05
145,00	175,00	4440125	4550,19	6227,87	1108,01	9474,57	1051,57	20252,63
145,00	175,00	4450125	4550,19	7026,48	798,61	10317,07	842,5	21893,74
145,00	175,00	4460112	4550,19	7595,12	568,64	10833,45	516,38	22978,76
145,00	175,00	4470050	4550,19	8391,63	796,51	11529,61	696,16	24471,43

Tab. 3.1

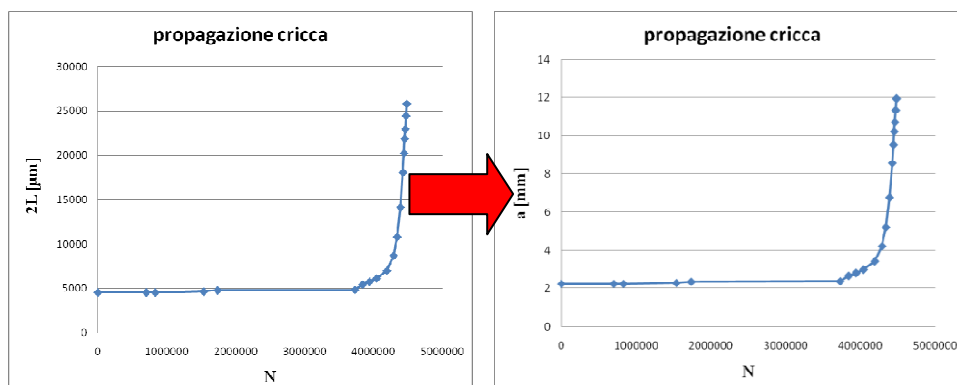


Fig. 3.15 propagazione cricca assile 14

Per avere un riscontro della bontà della stima analitica si sono analizzate quattro sezioni di assili tagliati in corrispondenza della cricca di fatica propagata, mediante programma CAD iscrivere delle ellissi che ricalchino la geometria della cricca riuscendo quindi a determinare lunghezza circonferenziale ($2c$), profondità (a) e semiasse maggiore (b) (vedi fig. 3.16a,b,c,d).

1) Assile 1



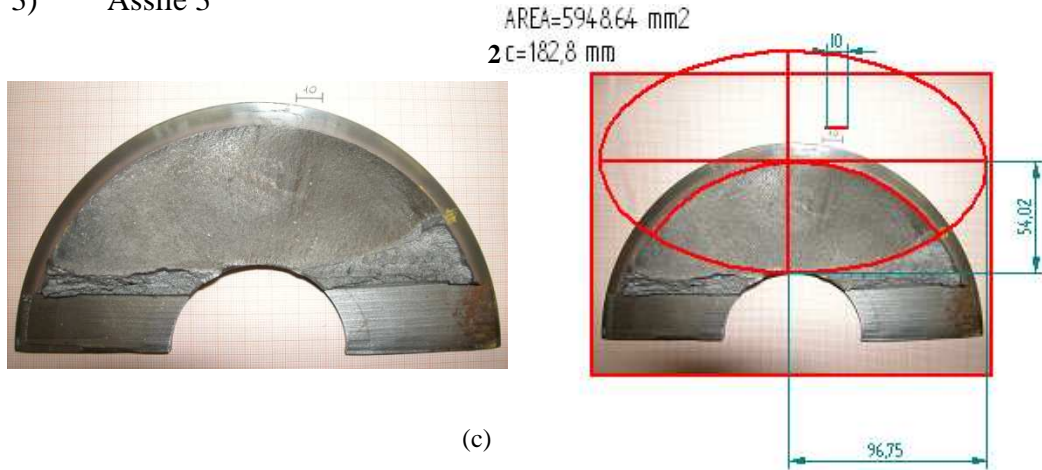
(a)

2) Assile 2



(b)

3) Assile 3



4) Assile 4

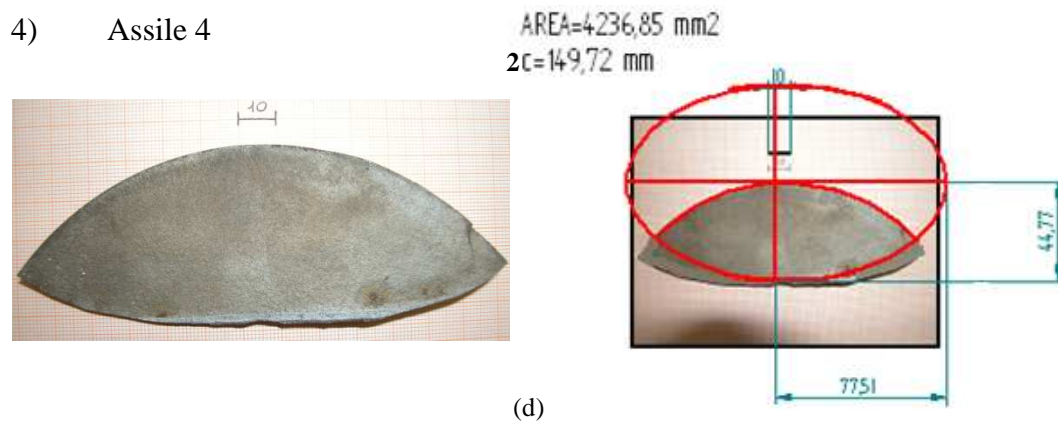


Fig. 3.16a,b,c,d assili sezionati

Si tracciano sul medesimo grafico la curva dei valori di profondità (ricavati analiticamente vedi eq. 3.2) della cricca propagata sull'assile provato al banco e degli assili sezionati (a) in funzione della semilunghezza circonferenziale (c) (fig. 3.17).

Per avere una miglior visione del confronto si prolunga la curva dei valori di profondità ricavate analiticamente.

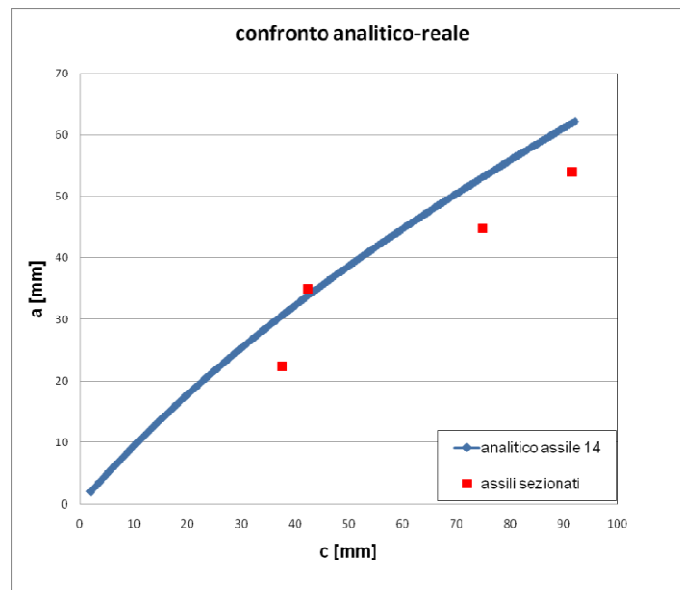


Fig. 3.17 andamento profondità in funzione della lunghezza superficiale della cricca

L'osservazione di questi andamenti, sebbene siano presenti pochi punti relativi alle profondità reali, sembrano confermare l'ipotesi semplificativa che associa alla cricca di fatica la geometria semi-ellittica.

3.1.1.1 Risultati Gilardoni RDG 500

L'ispezione ultrasonora di questo assile viene condotta in modalità secondo percorso (inclinazione del fascio 45 gradi) con sonda ATM45-4.

I dati acquisiti sono relativi a diversi step durante la propagazione della cricca.

Di seguito si riportano le risposte in dB relativa ad un picco al 60% del fondo scala (tab. 3.2).

controllo n°	n° cicli	risposta max [dB]
controllo 1	3728169	94,5
controllo 2	4190072	72
controllo 3	4290108	70
controllo 4	4340027	63,5
controllo 5	4390056	60,5
controllo 6	4425125	56,5
controllo 7	4440125	55
controllo 8	4470050	54,5

Tab. 3.2 risposte UT derivanti dall'ispezione della cricca assile 14

Con la solita procedura si passa poi al calcolo delle dimensioni del fascio e di conseguenza all'area investita (tab. 3.3).

controllo n°	largh. [mm]	prof. stimata [mm]	percorso [mm]	sup. tot. [mm ²]	sup. investita [mm ²]
controllo 1	4,55	2,38	125,45	8,505076711	8,505076711
controllo 2	6,99	3,42	125,74	18,77557141	18,77557141
controllo 3	8,68	4,22	126,37	28,76882057	28,76882057
controllo 4	10,8	5,22	126,12	44,27760686	44,27760686
controllo 5	14,15	6,77	126,47	75,23760976	75,23760976
controllo 6	18,09	8,55	126,18	121,4771412	121,4771412
controllo 7	20,25	9,51	125,24	151,2500148	146,6
controllo 8	24,47	11,35	125,4	218,1321662	173,8

Tab. 3.3 dimensioni cricca e relativa superficie investita dal fascio

Per confrontare la risposta della cricca propagatasi sull' assile con la risposta dei difetti presenti sui blocchi campione si deve convertire la risposta dal 60% del fondo scala all' 80% vedi eq. (3.3):

$$risp80\% = (risp60\%) + 20 \cdot \log_{10} \frac{80}{60} \quad (3.3)$$

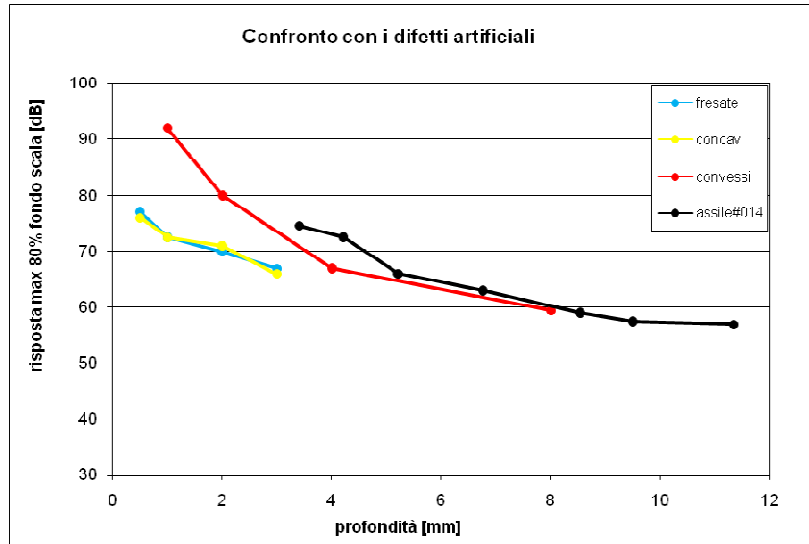
risposta max 60% [dB]	risposta max 80% [dB]
94,5	96,99877473
72	74,49877473
70	72,49877473
63,5	65,99877473
60,5	62,99877473
56,5	58,99877473
55	57,49877473
54,5	56,99877473

Tab. 3.4 conversione risposte

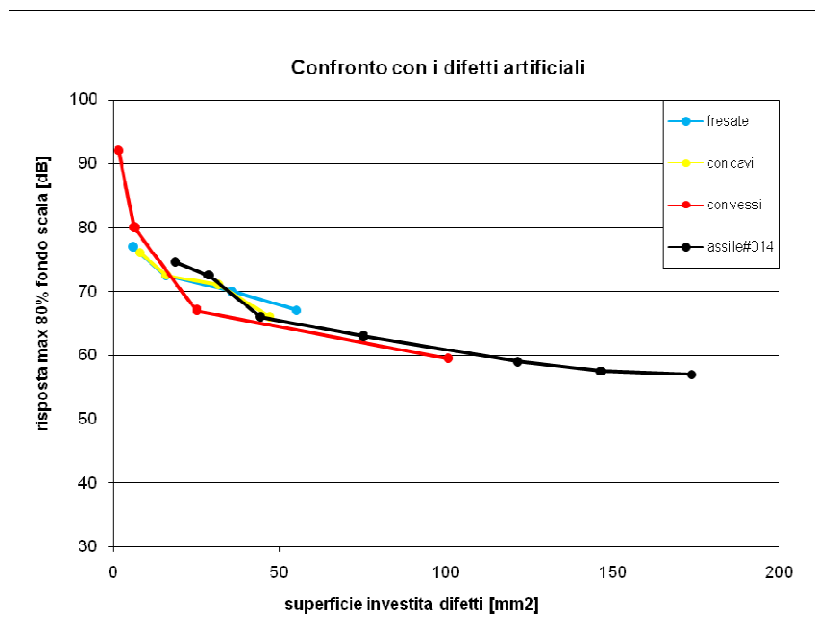
Rappresentando il valore delle risposte ottenute in funzione della profondità (fig. 3.18a) e dell'area investita (fig. 3.18b). è possibile effettuare il confronto con le curve ricavate per i difetti artificiali Osservando l'andamento delle risposte relative alle cricche naturali in funzione della profondità queste sembrano avvicinarsi a quelle relative ai difetti artificiali di forma convessa ovvero abbiamo un riscontro sull' ipotesi fatta precedentemente sulla somiglianza, come forma, della cricca di fatica con l'intaglio convesso o semi circolare, un'altra differenza sta nel minor valore in decibel delle risposte della cricca naturale a pari profondità degli intagli convessi ciò potrebbe essere spiegato da diversi fattori quali la diversa rugosità dell'intaglio oppure fattori legati all'operatore.

Le curve riguardanti i dati in funzione dell' area investita mostrano come al solito la perdita di dipendenza dalla geometria del difetto (le curve collassano su un'unica curva vedi fig. 3.18b) e un andamento lineare nel grafico semi-logaritmico (fig. 3.18c).

Gli stessi risultati si ottengono anche con il rilevatore ultrasonoro Harfang X-32.



(a)



(b)

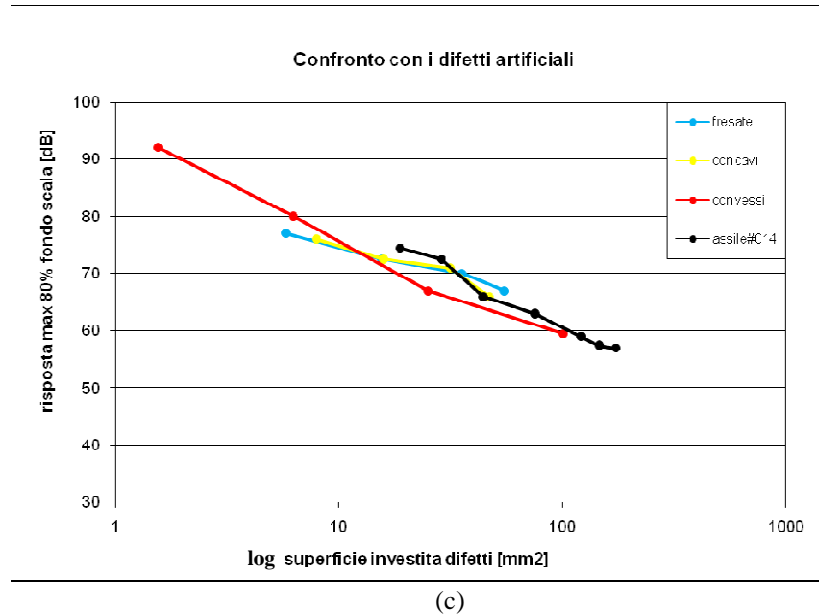


Fig. 3.18 confronto risposte UT di difetti artificiali e cricca naturale di fatica in funzione della profondità (a) e dell'area investita dal fascio (b,c)

3.1.1.2 Risultati Harfang X-32

Con le stesse modalità (ispezione in secondo percorso a 45°) ricaviamo prima le risposte in dB relativa ad un picco al 75% del fondo scala (tab. 3.5) dopodiché si calcolano le dimensioni del fascio e le relative aree investite (tab. 3.6).

controllo n°	n° cicli	risposta max [dB]
controllo 1	3728169	46
controllo 2	4190072	25
controllo 3	4290108	24
controllo 4	4340027	19,5
controllo 5	4390056	15,5
controllo 6	4425125	12,5
controllo 7	4440125	11
controllo 8	4470050	10

Tab. 3.5 risposte UT derivanti dall'ispezione della cricca assile 14

controllo n°	largh.[mm]	prof. stimata[mm]	percorso [mm]	sup. tot. [mm ²]	sup. investita [mm ²]
controllo 1	4,55	2,38	124,78	233,2447191	8,505076711
controllo 2	6,99	3,42	123,36	331,3525736	18,77557141
controllo 3	8,68	4,22	123,72	410,0551245	28,76882057
controllo 4	10,8	5,22	123,56	506,5686207	44,27760686
controllo 5	14,15	6,77	123,27	655,4445339	75,23760976
controllo 6	18,09	8,55	123,01	826,0311301	121,4771412
controllo 7	20,25	9,51	123,07	919,2266332	151,2500148
controllo 8	24,47	11,35	123,56	1101,447097	204,4

Tab. 3.6 dimensioni cricca e relativa superficie investita dal fascio

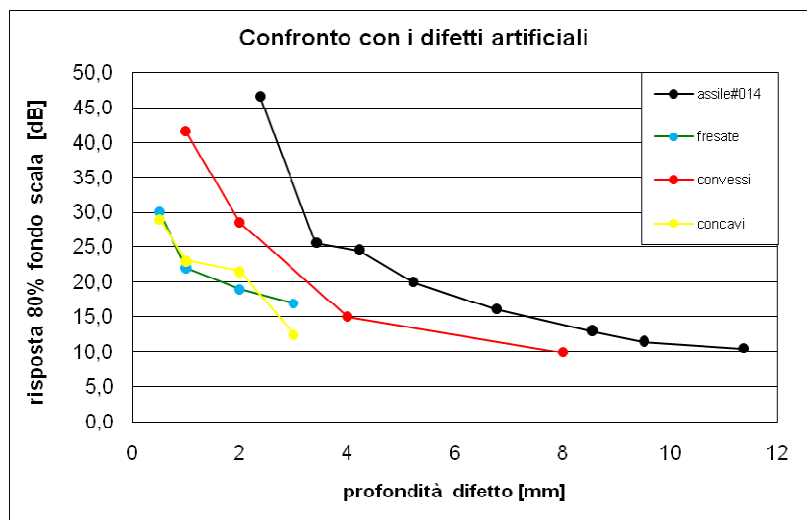
Si esegue la conversione della risposta all'80% del fondo scala per confrontarla con le altre acquisizioni (tab 3.7):

risposta max 75% [dB]	risposta max 80% [dB]
46	46,6
25	25,6
24	24,6
19,5	20,1
15,5	16,1
12,5	13,1
11	11,6
10	10,6

Tab. 3.7 conversione risposte

Dal primo grafico (fig. 3.19a) si nota la solita dipendenza dalla geometria del difetto e l'andamento pressoché simile tra la curva dei convessi e quella relativa all'assile anche se alle stesse profondità otteniamo valori abbastanza diversi in decibel.

Diagrammando in funzione dell'area investita (fig. 3.19b) si nota un avvicinamento delle curve quasi a collapsare su una unica (ma non è tanto evidente come per le risposte della RDG 500).



(a)

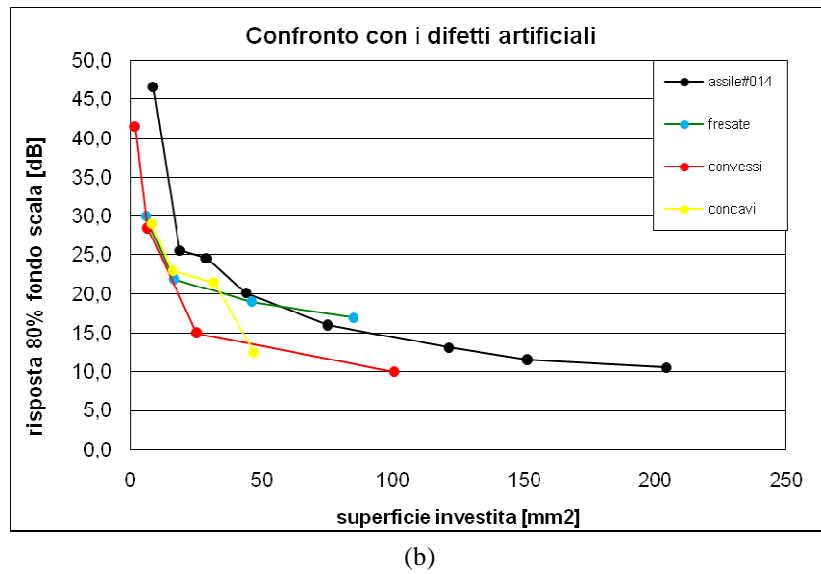


Fig. 3.19 confronto risposte UT di difetti artificiali e cricca naturale di fatica in funzione della profondità (a) e dell'area investita dal fascio (b)

CONFRONTO GILARDONI-HARFANG

Dall' osservazione dei coefficienti angolari delle rette interpolanti (fig. 3.18) abbiamo un'ulteriore conferma della sensibilità confrontabile dei due strumenti

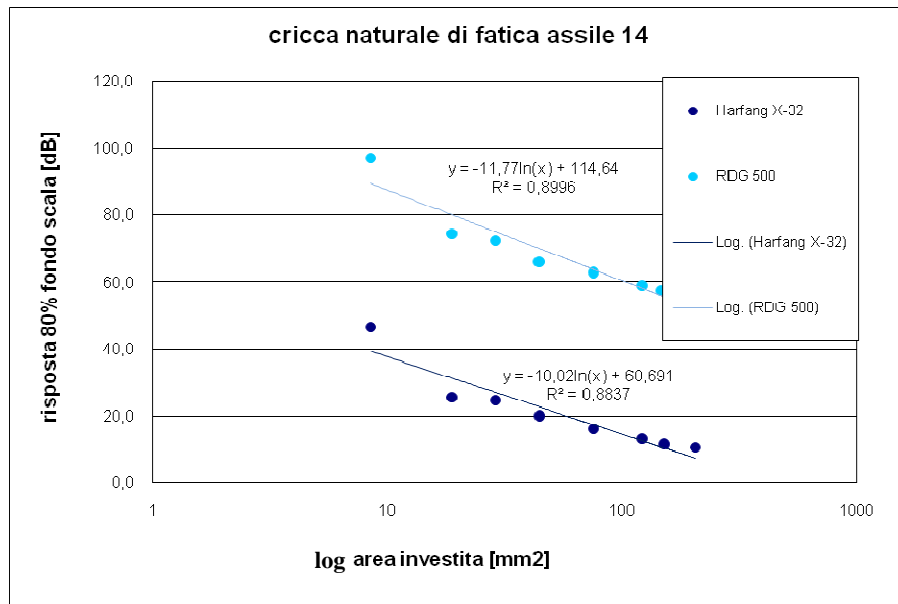


Fig. 3.18 confronto acquisizioni

3.1.2 Assile 019

Il secondo assile cavo sottoposto al banco dinamico è prodotto in acciaio 30NiCrMoV12 e presenta delle differenze geometriche ovvero una doppia transizione tra il corpo e la portata (fig. 3.20), questo cambiamento permette di avere libero accesso alla transizione sulla quale eseguire poi i microfori; per tali motivi si è dovuto cambiare il cuscinetto centrale (diametro 190 mm) e il sistema carter che chiude il monoblocco centrale e regola il ricircolo dell'olio all'interno del cuscinetto.

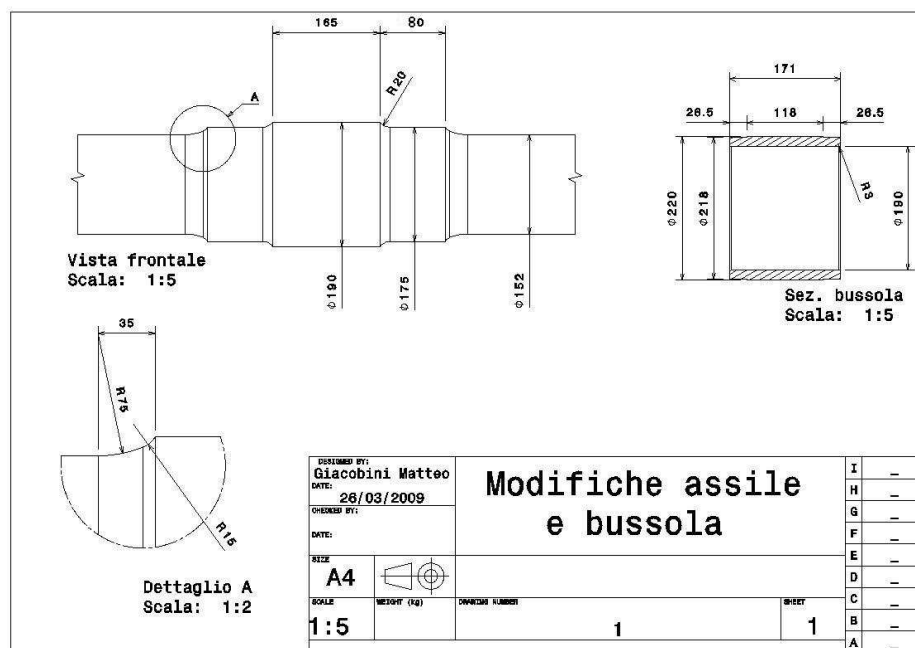


Fig. 3.20 assile 19

Per il nuovo assile si è pensato di realizzare un carter molto più semplice di quello utilizzato per l'assile precedente (fig. 3.21) che limitasse gli ingombri al fine di facilitare le operazioni di controllo UT ma che allo stesso tempo non comprometta il ricircolo dell'olio, esso comprende un'unica piastra in alluminio che chiude una gomma appositamente sagomata (fig. 3.22a,b).

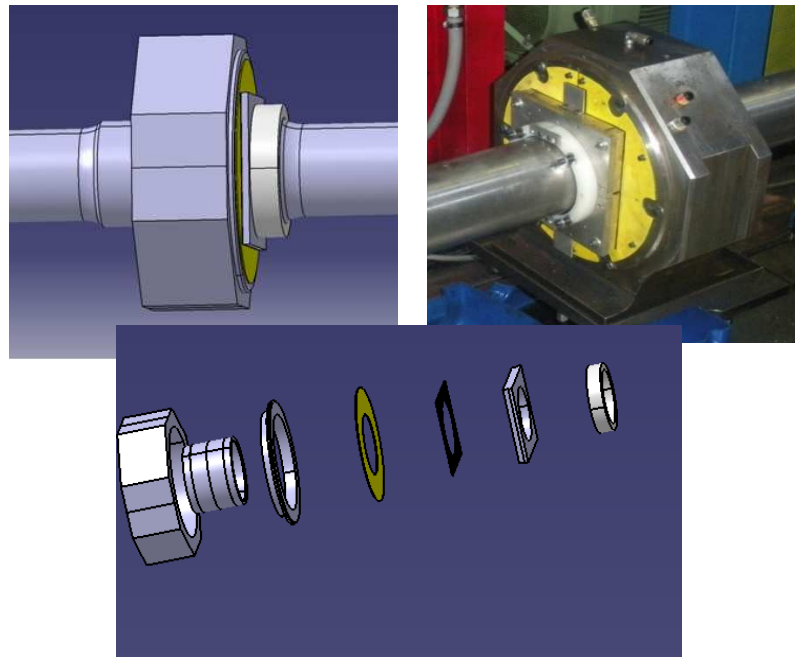


Fig. 3.21 carter assile 14

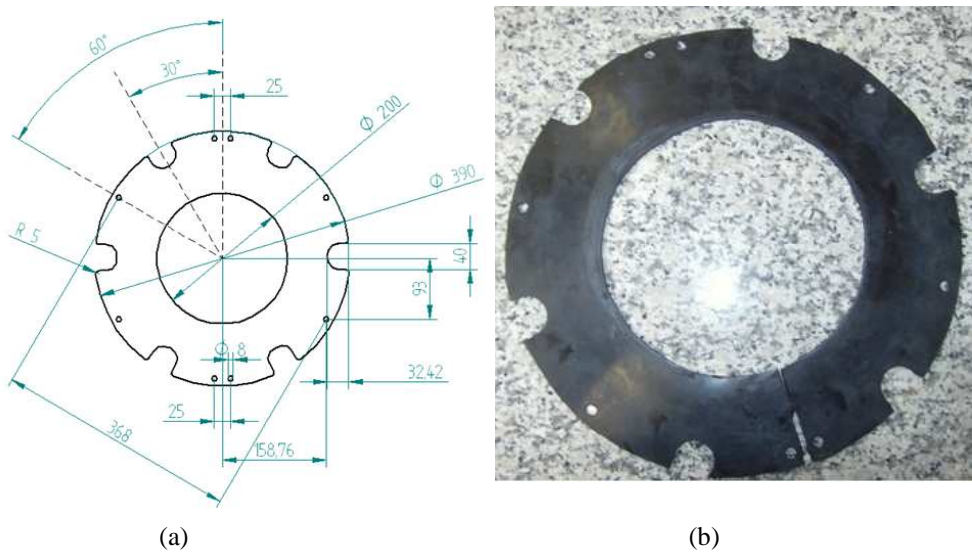


Fig. 3.22 piastra in alluminio(a), gomma(b)

Per quanto riguarda l'innesco della frattura si sono eseguiti sulla transizione tra il corpo assile e la prima portata quattro micro-fori di uguale diametro 0,6 mm ma diversa profondità rispettivamente di 0,5 mm i centrali e 0,2 mm quelli laterali (vedi fig. 3.23).

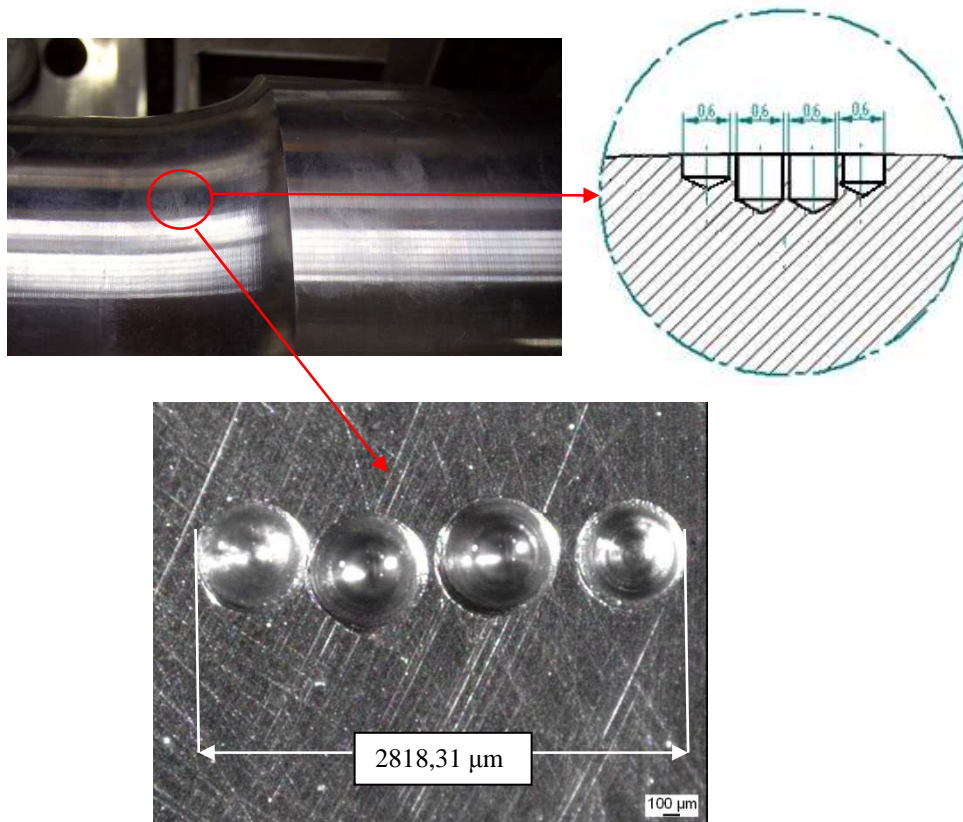


Fig. 3.23 microfori artificiali

Si calcola lo sforzo nella sezione del difetto con le formule già citate (vedi paragrafo 3.1.1 eq. 3.1) per aver un'idea del carico da impostare per la prova di propagazione (tab 3.8) :

Materiale	30NiCrMoV12
<i>F statico applicato [kN]</i>	215
<i>l [mm]</i>	1969,36
<i>braccio difetto [mm]</i>	776,68
<i>d esterno [mm]</i>	152,4
<i>d interno [mm]</i>	64,72
<i>J [mm⁴]</i>	25618259,69
<i>Mom centrale [Nmm]</i>	105853100
<i>Mom difetto [Nmm]</i>	83493100
<i>sigma difetto [MPa]</i>	248,3452935

sigma difetto impostato per la prova [MPa]	248
carico risultante [kN]	214,7010691

Tab. 3.8

La tabella 3.9 riassume invece gli step significativi dell'monitoraggio e controllo UT della cricca, in questo caso si è voluto contenere appositamente la lunghezza della cricca per aver un completamento delle curve di risposta UT anche alle piccole profondità e aree investite.

Carico [kN]	Sforzo [MPa]	N [cicli]	notch [micron]	L dx [micron]	ΔL dx [micron]	L sx [micron]	ΔL sx [micron]	2L [micron]
0	0	0	2818,31	0	0	0	0	2818,31
215,00	300,50	175000	2818,31	0	0	55,62	55,62	2873,93
215,00	300,50	205000	2818,31	0	0	208,99	153,37	3027,30
215,00	300,50	215000	2818,31	0	0	333,71	124,72	3152,02
215,00	300,50	225000	2818,31	41,5	41,5	465,17	131,46	3324,98

Tab. 3.9

L'avanzamento superficiale della cricca è stato monitorato oltre che con il solito sistema telecamera-microscopio anche eseguendo delle "repliche" con l'acetato che sono state molto utili per vedere l'evolversi della cricca e per confermare alcuni dubbi che potevano sorgere dalle acquisizioni della telecamera.

L'evoluzione della cricca rimane invariata per i primi 30000 cicli (fig. 3.24) ma sono sufficienti 90000 cicli per notare il primo segno tangibile di propagazione, ovvero la rottura del setto tra i due fori centrali (vedi fig. 3.25a,b).

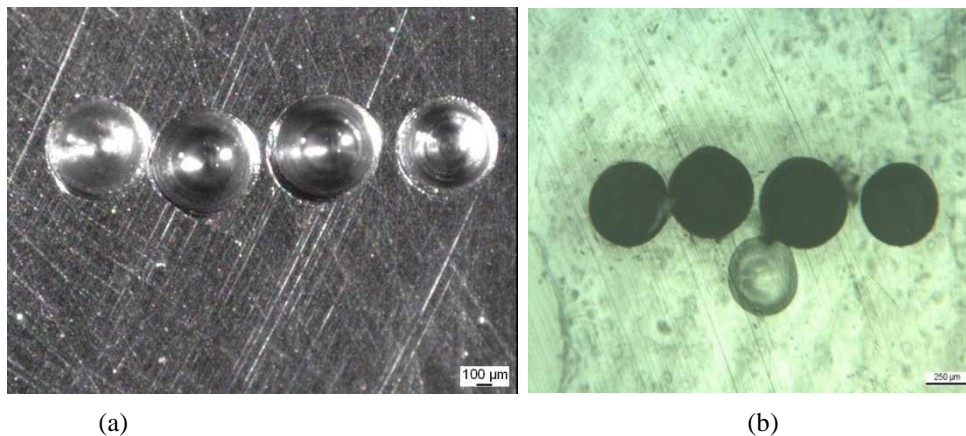


Fig. 3.24 30000 cicli foto telecamera 5x(a), foto replica 50x(b)

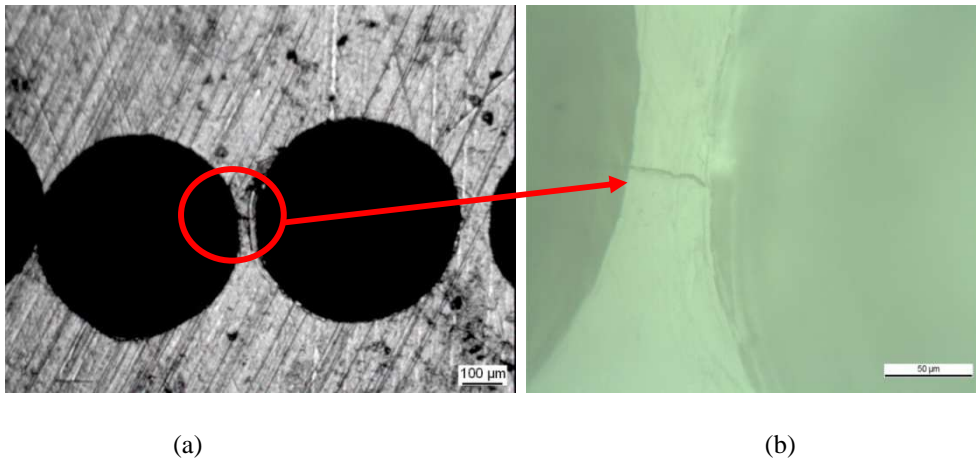


Fig. 3.25 90000 cicli rottura setto, foto telecamera 5x(a), foto replica 500x(b)

Si inizia a vedere la cricca dalla parte sinistra dei microfori solo dopo 175000 cicli (fig. 3.26a,b)

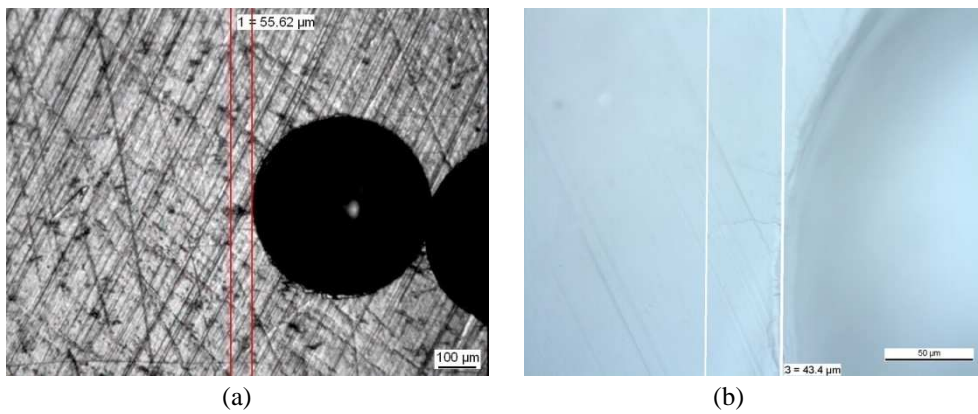


Fig. 3.26 175000 cicli inizio propagazione lato sinistro, foto telecamera 5x(a), foto replica 500x(b)

Successivamente la cricca inizia a interessare anche la parte destra dei microfori (fig. 3.27) continuando però sempre a propagare velocemente anche a sinistra (fig. 3.28).

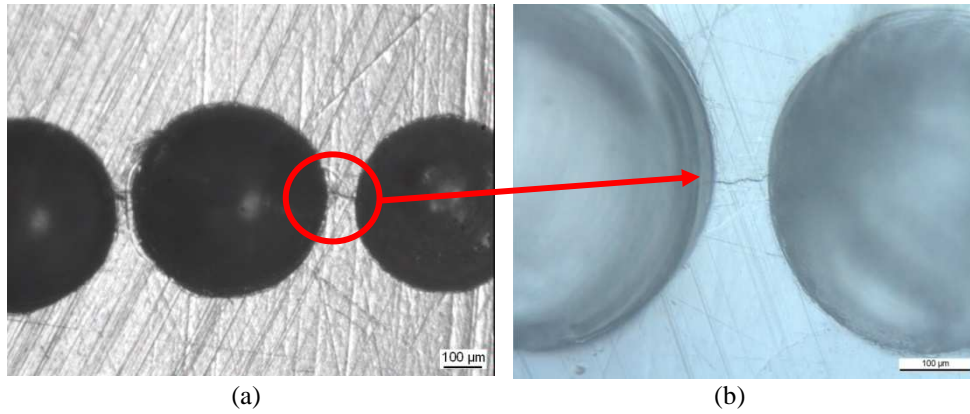


Fig. 3.27 205000 cicli rottura setto destro, foto telecamera 5x(a), foto replica 200x(b)

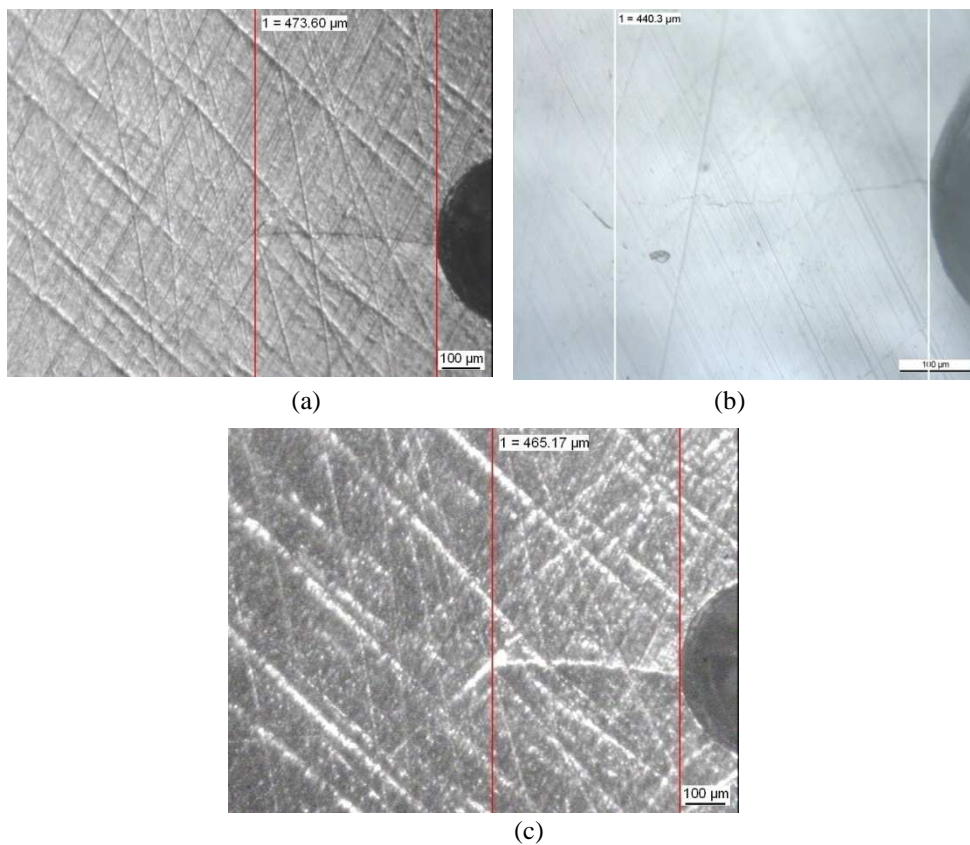


Fig. 3.28 225000 cicli cricca lato sinistro foto telecamera 5x(a) con luce radente (c), foto replica 200x(b),

L'estremità destra dei fori rimane invariata fino ai 225000 cicli, come mostrano le foto delle repliche osservate al microscopio (vedi fig. 3.29) il foro è completamente attraversato dalla cricca e si nota anche un avanzamento superficiale seppur di piccola entità (41.5 μm).

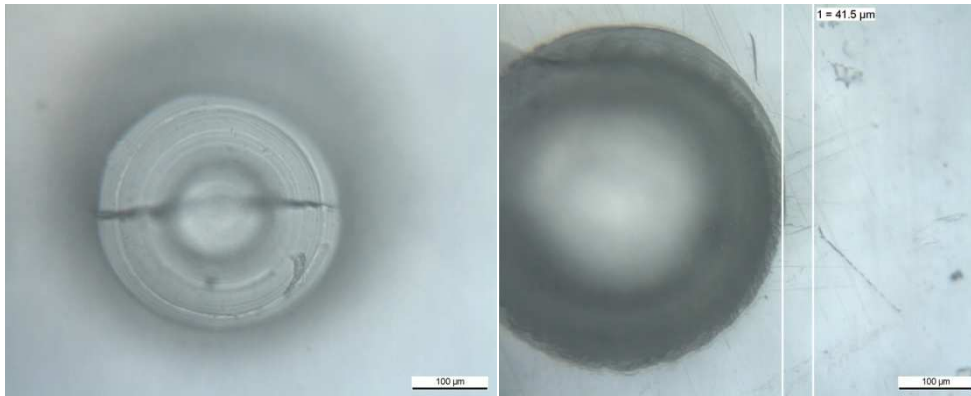


Fig. 3.29 225000 cicli cricca lato destro foto replica 200x

3.1.2.1 Risultati Gilardoni RDG 500

L'ispezione viene eseguita con la sonda ATM45-4 in modalità secondo percorso come fatto per il precedente assile.

Le risposte (trascritte nelle tab. 3.10 e 3.11) sono relative a due diversi tipi di controllo:

1. Cricca posizionata a 0 gradi (controllo da sopra)

controllo n°	n° cicli	risposta da sopra [dB]
controllo 0	0	105
controllo 1	105000	103
controllo 2	175000	100
controllo 3	205000	93,5
controllo 4	215000	90,5
controllo 5	225000	89

Tab. 3.10 ispezione cricca "chiusa" assile 19

2. Cricca posizionata a 180 gradi e applicazione di un dato carico (100 KN) per far sì che i lembi della cricca siano distaccati ed aver quindi una miglior risposta dagli ultrasuoni (controllo da sotto).

controllo n°	n° cicli	Risposta da sotto [dB]
controllo 0	0	102
controllo 1	105000	99,5
controllo 2	175000	94
controllo 3	205000	87,5
controllo 4	215000	84,5
controllo 5	225000	82,5

Tab. 3.11 ispezione cricca “aperta” assile 19

Come ipotizzato le risposte relative al controllo effettuato “da sotto” hanno un valore in decibel minore (Fig. 3.30) grazie all’ applicazione del carico che tiene “aperta” la cricca mantenendo i lembi separati, questo modo è quindi utile per facilitare l’ individuazione del difetto.

Con la solita procedura si passa poi al calcolo delle dimensioni del fascio e di conseguenza all’ area investita (tab. 3.12)

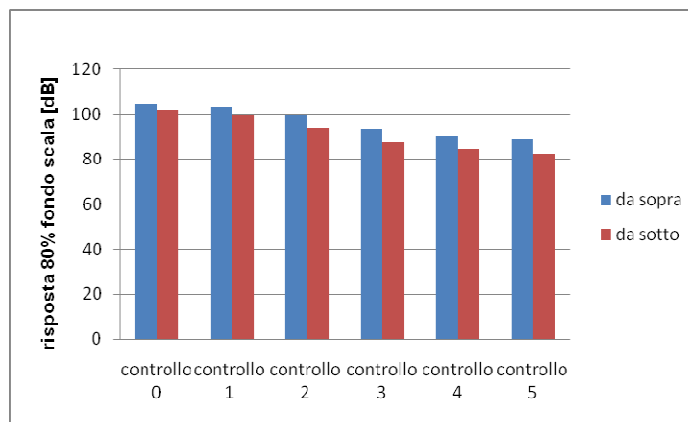


Fig. 3.30 confronto risposte

controllo n°	larghezza [mm]	profondità [mm]	percorso [mm]	sup. tot. [mm ²]	sup. investita [mm ²]
controllo 0	2,81831	1,396284	125,66	3,090668348	3,090668348
controllo 1	2,81831	1,396284	126,34	3,090668348	3,090668348
controllo 2	2,87393	1,423584	126,5	3,213284399	3,213284399
controllo 3	3,0273	1,498813	126,12	3,563631536	3,563631536
controllo 4	3,15202	1,559934	125,7	3,861758133	3,861758133
controllo 5	3,3249	1,644615	126,2	4,294698854	4,294698854

Tab. 3.12 dimensioni cricca e superficie investita dal fascio

Si nota come entrambe le curve delle risposte ottenute in funzione dell'area investita (in scala logaritmica) sia con il controllo effettuato da sopra che da sotto abbiano una pendenza molto diversa da quelle relative ai difetti artificiali e quella relativa alla cricca propagata sull' assile 14 (fig. 3.31) questo perché i difetti artificiali e l'innesco della frattura sull'assile 14 sono tutti eseguiti su una superficie piana (corpo) mentre sull'assile 19 la cricca interessa una superficie raccordata (transizione), ed è quindi più difficile da individuare (a pari area investita servono molti più decibel per individuare la cricca di fatica rispetto al difetto artificiale).

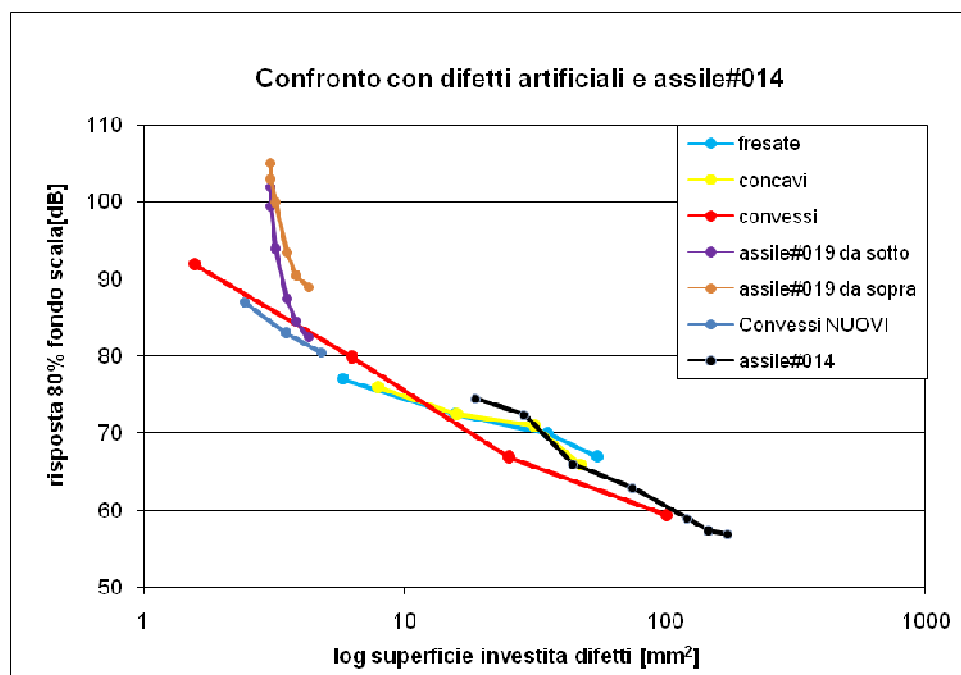


Fig. 3.31 andamento risposte in funzione dell'area investita dal fascio cricca assile 19 e confronto con i difetti artificiali

3.1.3 Assile 020

Il terzo assile cavo sottoposto al banco dinamico è prodotto in acciaio 30NiCrMoV12 e non presenta differenze geometriche di conseguenza gli sforzi agenti rimarranno immutati rispetto al precedente (assile 019). Per quanto riguarda l'innesco della frattura si sono realizzati quattro microfori di ugual diametro (0,6mm) ma di diversa profondità (0,5mm i centrali e 0,2 mm i laterali) (fig.3.32).

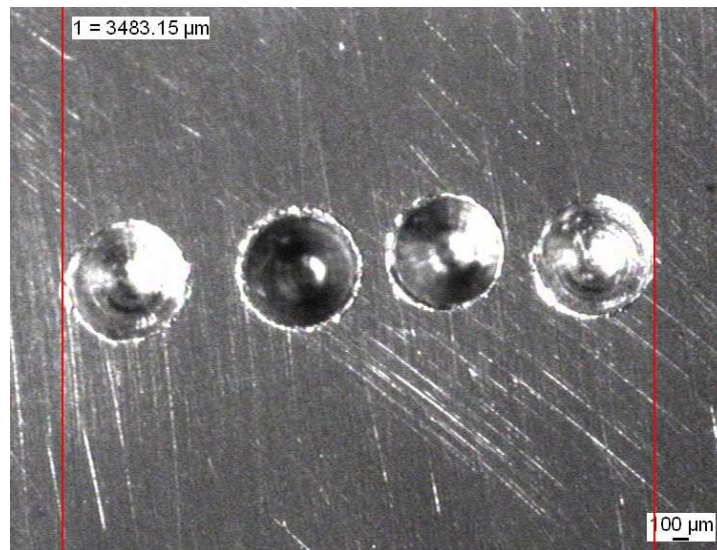


Fig. 3.32 micro-fori

Le modalità dell'esecuzione della prova e il controllo ultrasonoro della propagazione della cricca sono le stesse di quelle adottate per l'assile testato precedentemente. La tabella 3.13 riassume invece gli step significativi del monitoraggio e controllo UT della cricca, in questo caso si è voluto arrivare ad una lunghezza superficiale di cricca vicino ai 5 mm (corrisponde ad una profondità teorica calcolata di circa 2,5 mm) questo per vedere se le risposte ultrasonore relative alla propagazione continuano a descrivere la curva ottenuta dalle ispezioni del precedente assile sul quale è stata fatta propagare una cricca fino a circa 1,5 mm di profondità.

Carico [kN]	Sforzo [MPa]	N [cicli]	notch [micron]	L dx [micron]	ΔL dx [micron]	L sx [micron]	ΔL sx [micron]	2L [micron]
0	0	0	3483,15	0	0	0	0	3483,15
215,00	300,50	340000	3483,15	133,14	133,14	0	0	3616,29
215,00	300,50	350000	3483,15	465,7	332,56	329,45	329,45	4278,30
215,00	300,50	360000	3483,15	933,71	468,01	691	361,55	5107,86

Tab. 3.13

Come per le precedenti prove la propagazione della cricca inizia a manifestarsi con la rottura dei “ setti ” tra un foro e l’altro (fig. 3.33) avanzando fino alle estremità dei fori laterali (fig. 3.34a,b) e interessare poi la superficie a destra (fig. 3.35) e a sinistra dei fori (fig.3.36).

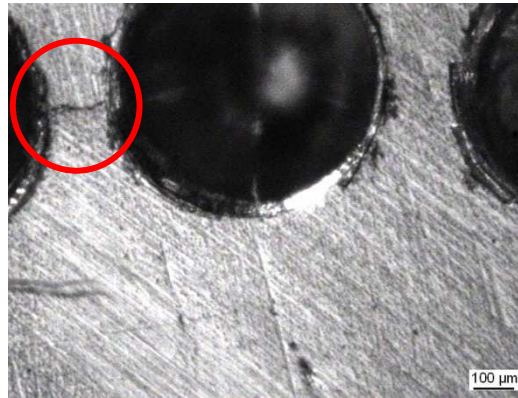


Fig. 3.33 190000 cicli rottura primo setto

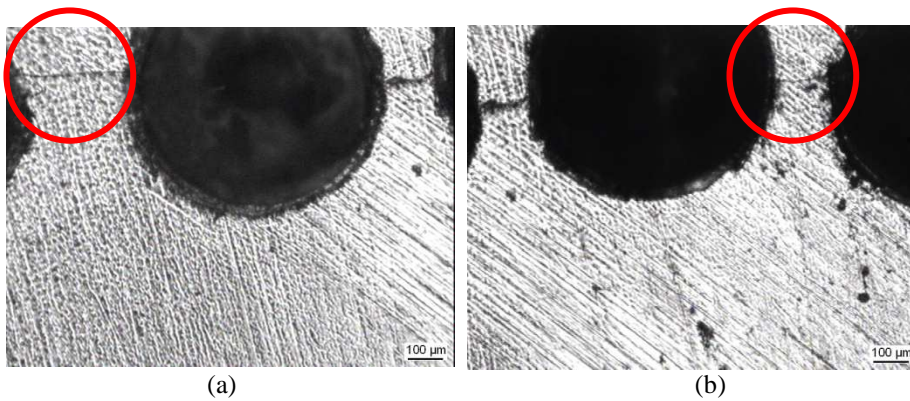


Fig. 3.34 310000 cicli rottura setto sinistro (a), 320000 cicli rottura setto destro (b)

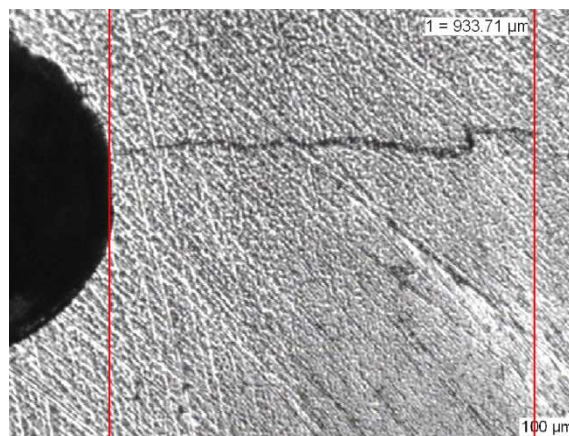


Fig. 3.35 360000 cicli fine propagazione parte destra dei microfori

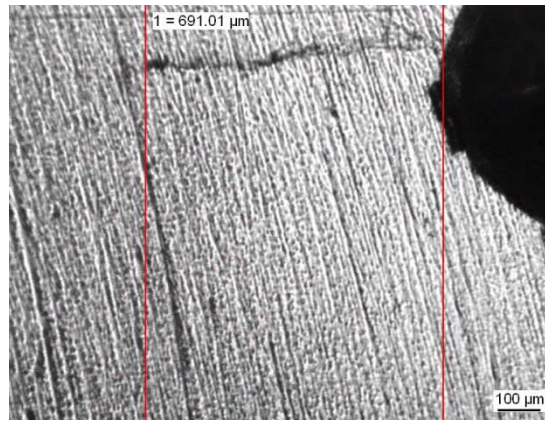


Fig. 3.36 360000 cicli fine propagazione parte sinistra dei microfori

3.1.3.1 Risultati Gilardoni RDG 500

L'ispezione viene eseguita con la sonda ATM45-4 in modalità secondo percorso come fatto per il precedente assile.

Le risposte (trascritte nelle tab. 3.14 e 3.15) sono relative a due diversi tipi di controllo:

1. Cricca posizionata a 0 gradi (controllo da sopra)

controllo n°	n° cicli	risposta da sopra [dB]
controllo 0	0	106
controllo 1	130000	103,5
controllo 2	280000	99,5
controllo 3	340000	86
controllo 4	350000	82,5
controllo 5	360000	78,5

Tab. 3.14 ispezione cricca "chiusa" assile 20

2. Cricca posizionata a 180 gradi e applicazione di un dato carico (100 KN) per far si che i lembi della cricca siano distaccati ed aver quindi una miglior risposta dagli ultrasuoni (controllo da sotto).

controllo n°	n° cicli	Risposta da sotto [dB]
controllo 0	0	106
controllo 1	130000	100
controllo 2	280000	96
controllo 3	340000	82,5
controllo 4	350000	77
controllo 5	360000	73,5

Tab. 3.15 ispezione cricca "aperta" assile 20

Come osservato per l'assile 19 le risposte relative al controllo effettuato "da sotto" hanno un valore in decibel minore grazie all' applicazione del carico che tiene "aperta" la cricca mantenendo i lembi separati, questo modo è quindi utile per facilitare l' individuazione del difetto.

Con la solita procedura si passa poi al calcolo delle dimensioni del fascio e di conseguenza all'area investita (tab. 3.16)

controllo n°	larghezza [mm]	profondità [mm]	percorso [mm]	sup. tot. [mm ²]	sup. investita [mm ²]
controllo 0	3,48315	1,721972	130,3	4,710729255	4,710729255
controllo 1	3,48315	1,721972	128,7	4,710729255	4,710729255
controllo 2	3,48315	1,721972	129,23	4,710729255	4,710729255
controllo 3	3,61629	1,787027	129,76	5,075563272	5,075563272
controllo 4	4,2783	2,109676	130,12	7,088867816	7,088867816
controllo 5	5,10786	2,512068	129,87	10,0776729	10,0776729

Tab. 3.16 dimensioni cricca e superficie investita dal fascio

A dimostrazione dei risultati ottenuti con l' assile 19 anche in questo caso si nota come entrambe le curve delle risposte ottenute in funzione dell'area investita (in scala logaritmica) sia con il controllo effettuato da sopra che da sotto abbiano una pendenza molto diversa da quelle relative ai difetti artificiali e quella relativa alla cricca propagata sull' assile 14 (fig. 3.37) a causa della posizione che interessa la zona di propagazione delle due cricche (superficie non liscia ma raccordata) inoltre le curve relative all'assile 20 sembrano prolungare l'andamento delle risposte relative al controllo sull'assile 19 e ricongiungersi con le risposte associate al controllo dell'assile 14.

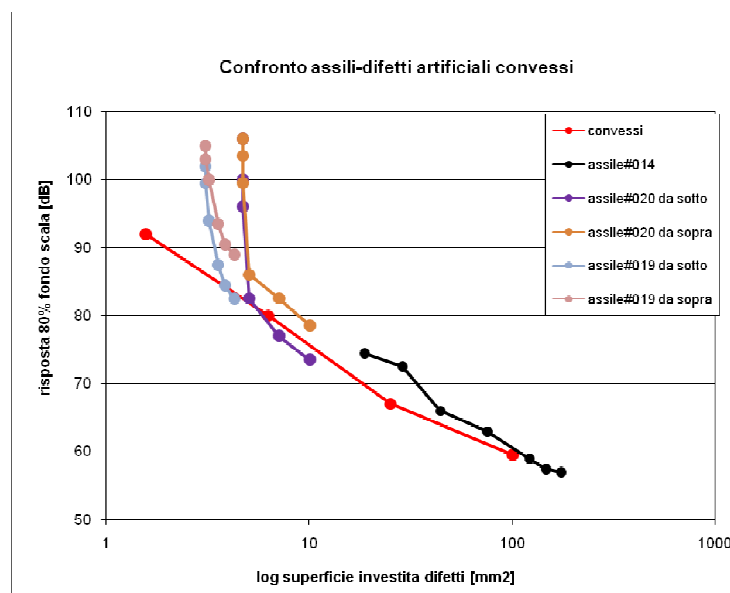


Fig. 3.37 andamento risposte in funzione dell'area investita dal fascio cricche assili e confronto con i difetti artificiali convessi

3.2 Analisi cricche naturali di fatica-fretting (Lucchini)

La resistenza a fatica delle portate di caletto di un'assile è inferiore a quella delle superficie libere a causa dell'instaurarsi di micro scorrimenti tra il mozzo della ruota e la portata sotto l'azione del momento flettente rotante. Le forze d'attrito danno luogo in questo modo ad un fenomeno d'usura superficiale localizzato in una fascia prossima allo spigolo della portata dove l'entità degli scorrimenti relativi è rilevante. Nonostante l'azione di tali forze sia massima in corrispondenza dello spigolo la rottura del componente è posizionata internamente dove gli sforzi flessionali legati al carico agente tendono a crescere [17].

Per poter studiare la risposta ultrasonora di quest'altro tipo di difetto tipico del cedimento non più del corpo ma della portata dell'assile ferroviario (fig. 3.38) ci siamo occupati di un set di assili fuori esercizio di proprietà dell'azienda Lucchini Sidermeccanica S.p.A di Lovere.

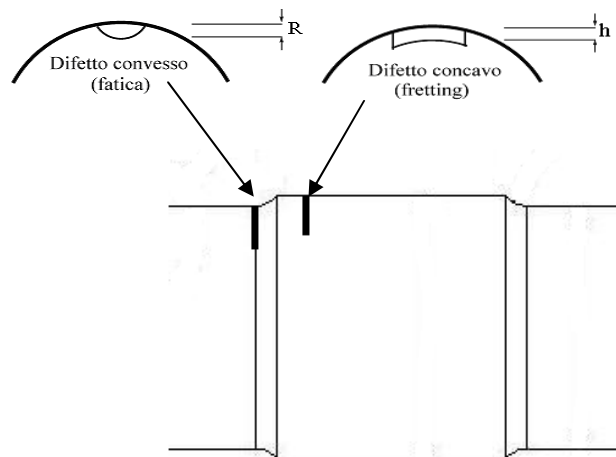


Fig. 3.38 difetti tipici negli assili ferroviari

Il controllo a ultrasuoni su scala industriale degli assili cavi viene effettuato mediante borosonda ovvero un dispositivo automatico che comanda un braccio su cui sono installate diverse sonde che ispezionano l'assile scorrendo all'interno del foro bareno (primo percorso), nel nostro caso considereremo solo i dati provenienti dalla sonda a 45 gradi.

La geometria degli assili considerati (fig. 3.39) è quella riferita al campione full-scale numero 14 della prova di propagazione descritta precedentemente (transizione unica).

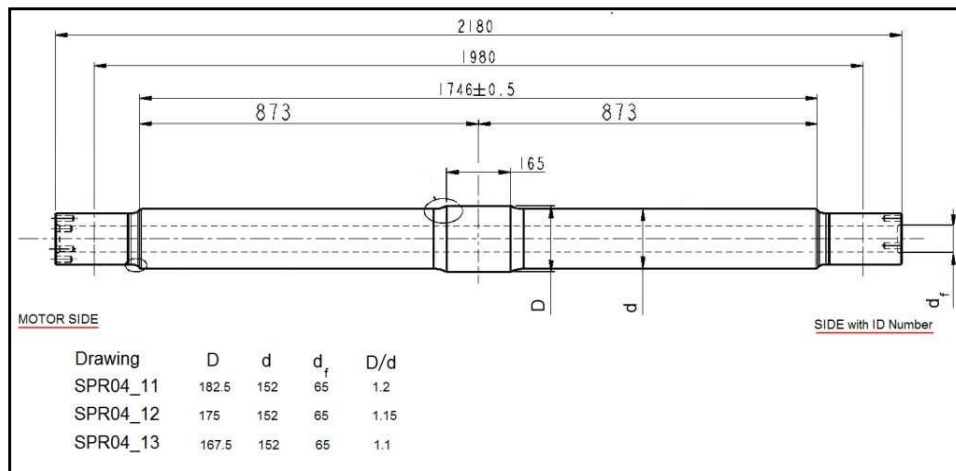


Fig. 3.39 geometria comune al set di assili considerati

3.2.1 Borosonda

La tabella 3.17 riassume le acquisizioni della borosonda di tutte le cricche presenti nel set di assili; le dimensioni del fascio sono calcolate secondo le caratteristiche della sonda utilizzata:

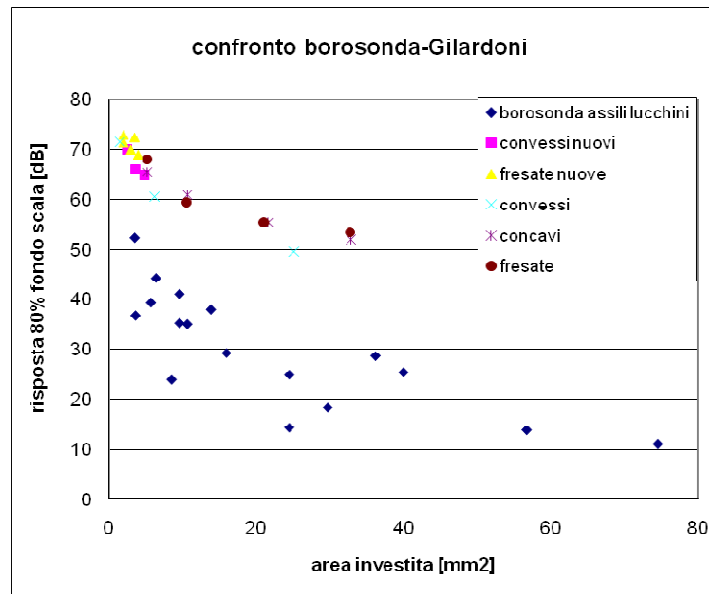
- dimensioni cristallo: altezza 10mm, larghezza 10mm
- $K = 0,91$
- $\lambda_m = 0,0008075$

depth [mm]	larghezza [mm]	gain [dB]	r. est [mm]	r. int [mm]	percorso [mm]	h/2 fascio [mm]	largh fascio [mm]	area investita [mm ²]
19,4	60	13,9	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	56,73036495
2,3	25	25	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	24,49912776
35,1	100	11,2	91,25	32,5	83,08504679	6,105296951	12,2105939	74,54930171
1,5	40	29,3	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	15,97769202
2,3	50	14,4	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	24,49912776
0,8	20	24	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	8,521435744
3,5	37	25,5	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	40,00918002
2,6	15	18,4	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	29,72110516
0,5	12	39,4	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	5,715597145
0,6	6	36,8	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	3,6
0,8	8	44,3	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	6,4
0,5	7	52,3	87,5	32,5	77,78174593	5,715597145	11,43119429	3,5
1,3	50	38	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	13,84733308
3,4	50	28,7	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	36,21610191
1	30	35,1	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	10,65179468
0,9	30	35,3	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	9,586615212
0,9	40	41,1	83,75	32,5	72,47844507	5,32589734	10,65179468	9,586615212

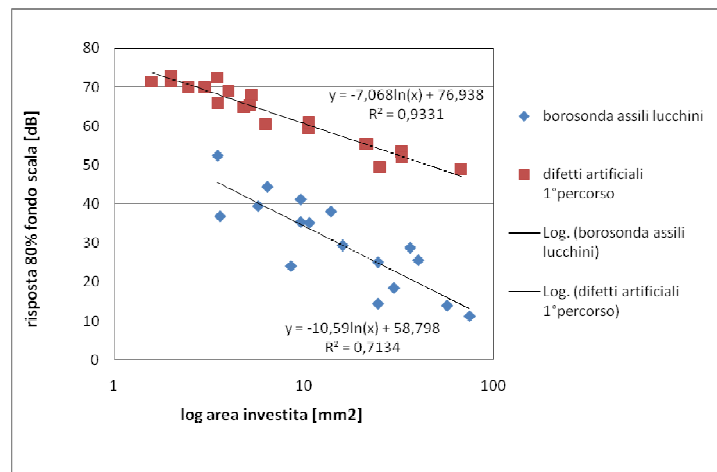
Tab. 3.17

I grafici che seguono mostrano il confronto dei risultati ottenuti dalla borosonda sugli assili con i difetti artificiali analizzati, sempre in primo percorso a 45 gradi,

con il rilevatore ultrasonoro Gilardoni RDG 500 (fig.3.40a,b) in questo caso si nota, soprattutto diagrammando in scala logaritmica, una somiglianza tra le pendenze delle rette interpolanti mentre per quanto riguarda il confronto con le acquisizioni eseguite con il rilevatore Harfang (fig.3.41a,b) non si ottiene lo stesso risultato.

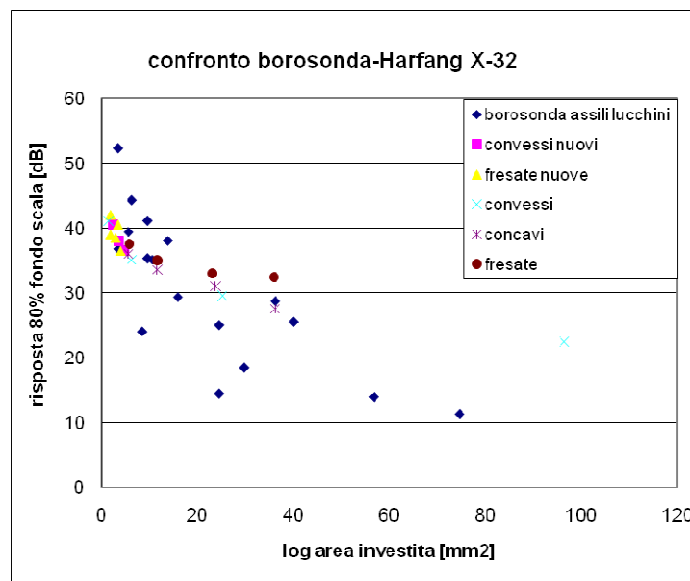


(a)

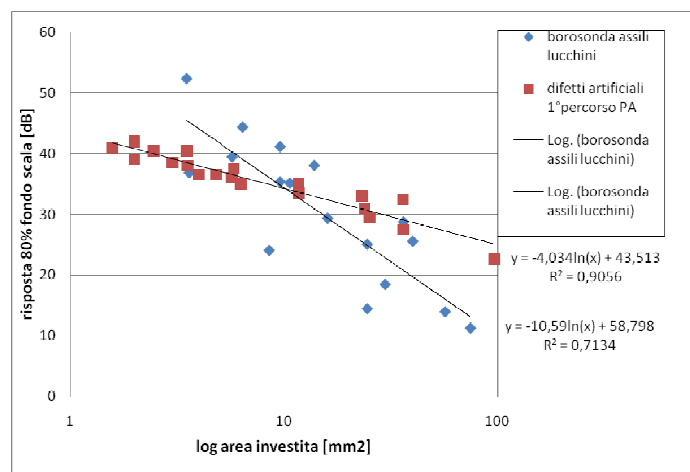


(b)

Fig.3.40 confronto risposte cricche di fatica-fretting con i difetti artificiali in funzione dell'area investita (a), in scala logaritmica (b)



(a)



(b)

Fig. 3.41 confronto risposte cricche di fatica-fretting con i difetti artificiali in funzione dell'area investita (a), in scala logaritmica (b)

3.2.2 Gilardoni RDG 500 analisi in 2° Percorso

Lo stesso set di assili è oggetto di un'ulteriore ispezione condotta con il rilevatore Gilardoni in modalità secondo percorso per effettuare poi il confronto con i difetti artificiali analizzati allo stesso modo.

È risultato molto utile, prima del controllo ultrasonoro, individuare le cricche mediante l'utilizzo di liquidi magnetici fluorescenti (fig. 3.42) così da riuscire ad

avere una stima molto efficace delle loro lunghezze (fig.3.43) mentre i rispettivi valori di profondità sono stati forniti dall'azienda (tab. 3.18).

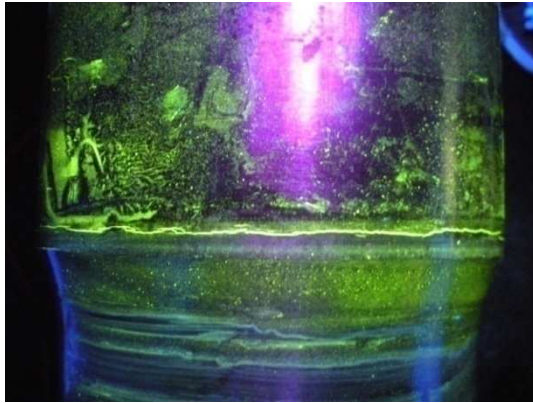


Fig. 3.42 cricca sulla portata individuata con liquidi magnetici fluorescenti

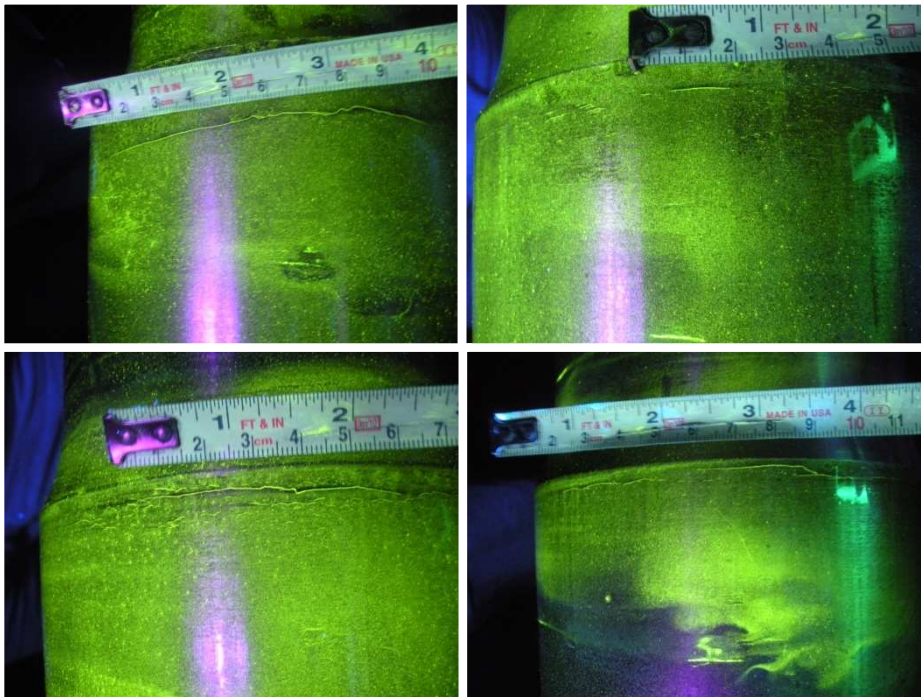


Fig.3.43 stima lunghezze

assile	d portata [mm]	d corpo [mm]	lungh. cricca [mm]	max profondità cricca [mm]
1348-05	167,5	152	58	19,4
1348-05	167,5	152	14	2,3
500011-0601	182,5	152	102	35,1
1349-06	175	152	98	2,6
1349-06	175	152	49	0,6
1348-01	167,5	152	143	6,7
1348-01	167,5	152	117	1,2
1509-1	167,5	152	184	20,6
1509-1	167,5	152	non rilevata	9,4

Tab. 3.18 riepilogo cricche presenti nel set di assili

In base alle dimensioni sia della cricca che del fascio ultrasonoro emesso, si è in grado di risalire alla superficie investita da quest'ultimo per poi relazionarla alla risposta ottenuta dal rilevatore (tab. 3.19).

assile	sup. difetto investita [mm ²]	risposta 80% fondo scala [dB]
1348-05	210,6	78
1348-05	32,24	84,5
500011-0601	244,9	76
1349-06	59,06	89
1349-06	13,78	96
1348-01	138,6	74,5
1348-01	26,45	87,5
1509-1	210,6	73,5
1509-1	182,1	86

Tab. 3.15

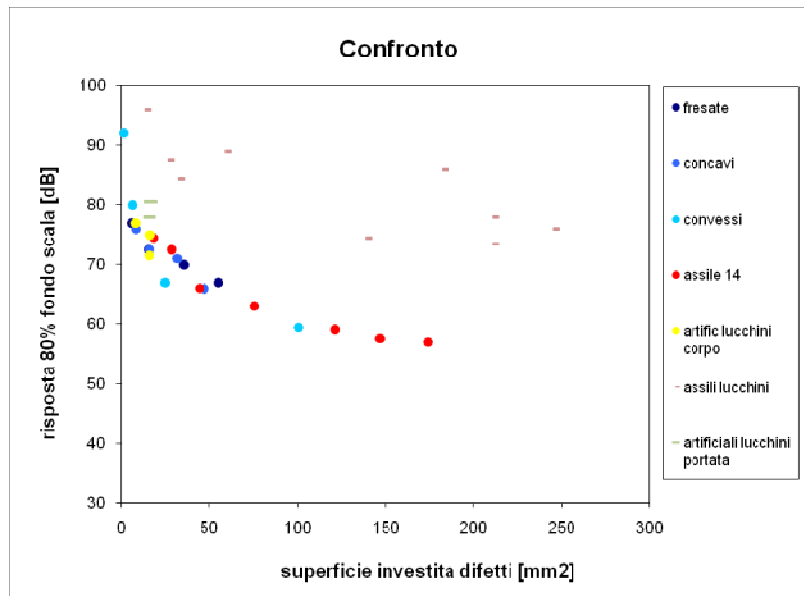
A completare il quadro delle acquisizioni eseguite in Lucchini si è preso in considerazione anche un blocco campione, provvisto di corpo e portata, su cui sono ricavati le solite geometrie di difetti artificiali (tab. 3.20).

sez.	descrizione	profondità [mm]	sup. investita [mm ²]	risposta 80% [dB]
sezione AA	difetto naturale	non rilevata	-----	81,00
sezione BB	concavo 1 mm su portata	1	16,00	78,00
sezione DD	convesso 5x2 su portata	2	7,79	non rilevata
sezione EE	fresata 1 mm su portata	1	17,04	80,50
sezione FF	concavo 1 mm su corpo	1	16,00	71,50
sezione GG	convesso 5x2 su corpo	2	7,79	77,00
sezione HH	fresata 1 mm su corpo	1	16,37	75,00

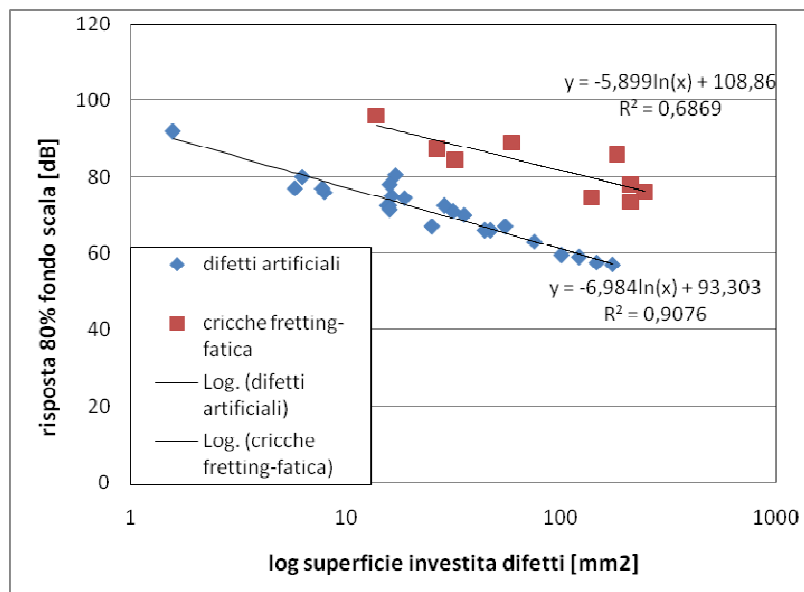
Tab. 3.20 blocco campione Lucchini

Dal confronto con i difetti artificiali si osserva che: la curva delle risposte ottenute dalle cricche di fretting-fatica è traslata rigidamente verso l'alto rispetto a quella dei difetti artificiali (fig. 3.44a,b) ciò è dovuto al fatto che le

cricche da fretting-fatica possono essere anche discontinue e molto frastagliate cosa che le rende più difficili da identificare.



(a)



(b)

Fig. 3.44 confronto risposte cricche da fretting-fatica e difetti artificiali in funzione dell'area investita (a), in scala logaritmica (b)

Capitolo 4

Analisi ultrasonora di difetti: controlli di dimensionamento

Un altro aspetto fondamentale del controllo UT riguarda il passo successivo all'individuazione dei difetti presenti in un qualsiasi componente meccanico ed è appunto la determinazione dell'estensione del difetto in termini di larghezza e profondità. Molteplici sono le tecniche e i metodi adottati per il dimensionamento descritti in letteratura (per citarne alcune creeping waves, metodo 6 dB e 20 dB, metodo DAC e diagrammi ADA, diffrazione) secondo criteri come: tipo di difetto, strumenti in dotazione, accessibilità delle ispezioni sta all'operatore scegliere l'applicazione più idonea.

In questo caso trattandosi di difetti e cricche affioranti in superficie si è scelto di mettere a confronto due metodi: il primo denominato metodo 6 dB verrà adottato per la determinazione della larghezza e della profondità dei difetti, il secondo invece sfrutta il fenomeno della diffrazione del fascio ultrasuono per la determinazione della profondità [1,2].

Le acquisizioni riguarderanno prima i blocchi campione e successivamente gli assili del banco dinamico con le stesse strumentazioni adoperate per l'individuazione dei difetti.

4.1 Configurazioni adottate

1. RDG 500 sonda ATM45-4 larghezza e dimensione caratteristica con metodo 6 dB.

Per avere una stima della larghezza si procede in questo modo: prima di tutto si posiziona il trasduttore in modo da ottenere la massima risposta in decibel dal riflettore (difetto) considerato, agendo sul guadagno si porta l'eco di risposta visualizzato dall'A-scan all'80% dell'altezza utile dello schermo (80% del fondoscala) poi si fa traslare la sonda parallelamente al difetto prima verso sinistra fin quando il picco visualizzato raggiunge il 40% del fondo scala (perché corrisponde ad una diminuzione di 6dB) avendo sempre cura di mantenere la sonda nella corretta posizione a questo punto con una penna si fa un segno sul pezzo (per comodità prendiamo come riferimento uno dei lati dello zoccolo), si ripete l'operazione dall'altra parte (verso destra) ripassando per il massimo (per controllare di essere sulla stessa linea)

e andando a segnare sempre sul pezzo il punto in cui il picco viene dimezzato; la distanza tra i segni in cui si verifica il dimezzamento è la dimensione del riflettore (in fig. 4.1 sono raffigurate le fasi del metodo). Per quanto riguarda la stima della dimensione caratteristica per i fori vale il metodo descritto sopra, invece per gli altri difetti il metodo differisce per la direzione di scansione non più parallela ma ortogonale (in avanti e indietro rispetto al massimo) dopodiché si trascrivono le letture dei percorsi in millimetri e con una semplice operazione aritmetica si ha una stima della profondità per i difetti tipo fresata e concavo mentre per i convessi otteniamo una stima del raggio.

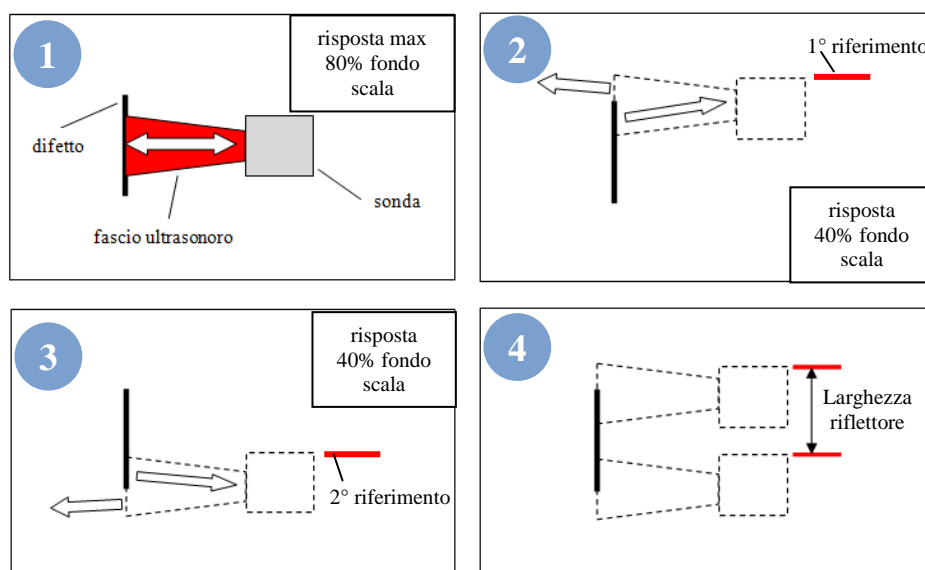


Fig.4.1 schema metodo 6 dB per la determinazione della larghezza

2. RDG 500 sonda ATM70-4 dimensione caratteristica con metodo diffrazione.

Questa sonda emette un fascio ultrasonoro inclinato di 70 gradi, tale da permettere la ricerca dei difetti in primo percorso.

Se nel caso della riflessione speculare il fronte d'onda viene reindirizzato, dopo aver colpito una discontinuità, secondo le leggi dell'ottica geometrica con la diffrazione invece solo parte del fronte d'onda interferisce in modo costruttivo per produrre il segnale diffratto ad un determinato angolo mentre la maggior parte dell'energia ultrasonora si perde, infatti si rileva che è solo la punta/spigolo del difetto a produrre il segnale diffratto.

Con la sonda appoggiata sul pezzo ci si avvicina al difetto in esame fino a che si visualizza il solito eco di risposta una volta individuato lo si

massimizza e si porta all'80% del fondo scala (fig. 4.2). La stima della profondità esce da considerazioni puramente geometriche una volta note l'inclinazione del fascio e il percorso a cui viene visualizzato l'eco di risposta diffratto (eq. 4.1).

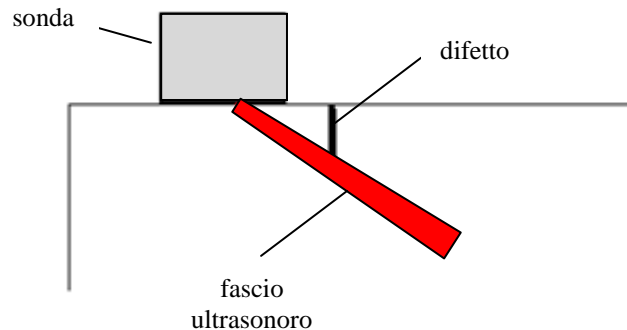


Fig. 4.2 schema diffrazione sonda ATM70-4

$$\text{profondità} = \text{percorso eco diffratto} \times \sin 20 \quad (4.1)$$

3. Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 45°

Grazie alla modalità di visualizzazione S-scan possiamo rilevare la profondità/percorso in cui si trova il corner e quella in cui si trova la diffrazione, sottraendo queste distanze si ottiene una stima della profondità del difetto.

Manualmente si procede come nelle normali ispezioni in secondo percorso identificando la risposta massima (eco di riflessione nel corner del difetto), dopodiché muovendo avanti e indietro il trasduttore si visualizzerà un secondo eco (sempre se le dimensioni del difetto lo permettono) relativo alla diffrazione caratterizzato da un maggior angolo di apertura del fascio e da un minor percorso come si può ben notare nella fig. 4.3, l'eco diffratto ha inoltre la caratteristica di rimanere perpendicolare all'eco di risposta massima.

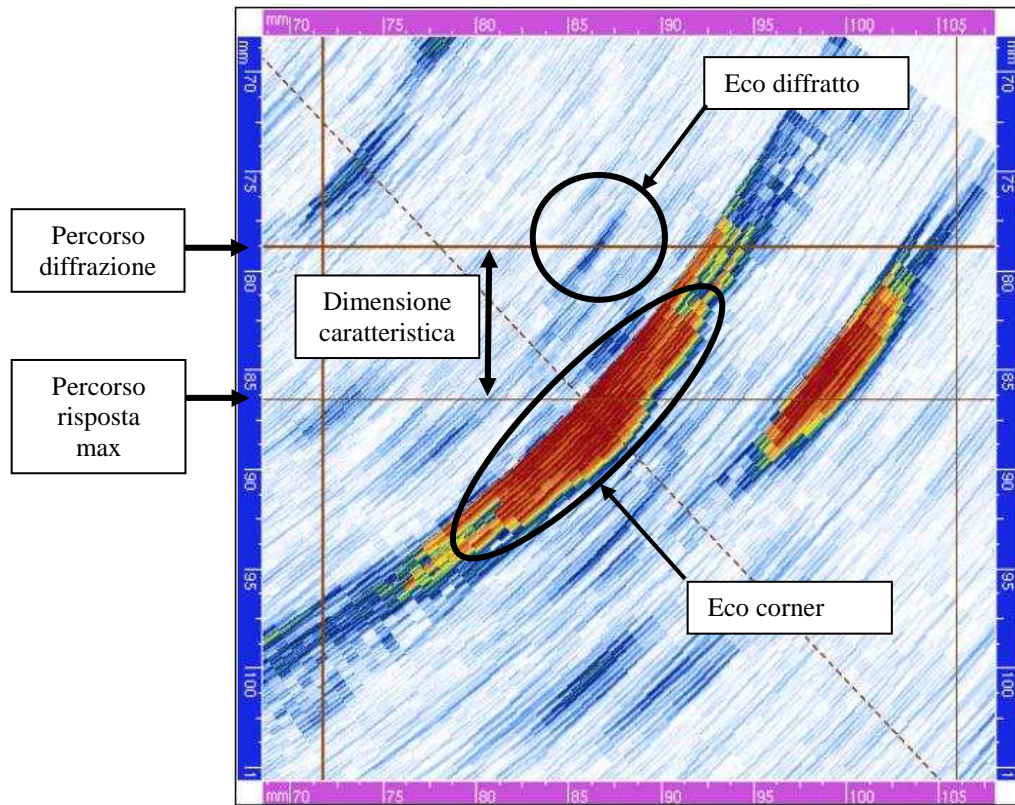


Fig. 4.3. S-scan del difetto convesso 8 mm

4. Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 72°

Questa operazione segue gli stessi passaggi svolti con la strumentazione precedentemente descritta (dimensionamento con Gilardoni e sonda ATM70-4) con la possibilità però di visualizzare anche l' S-scan.

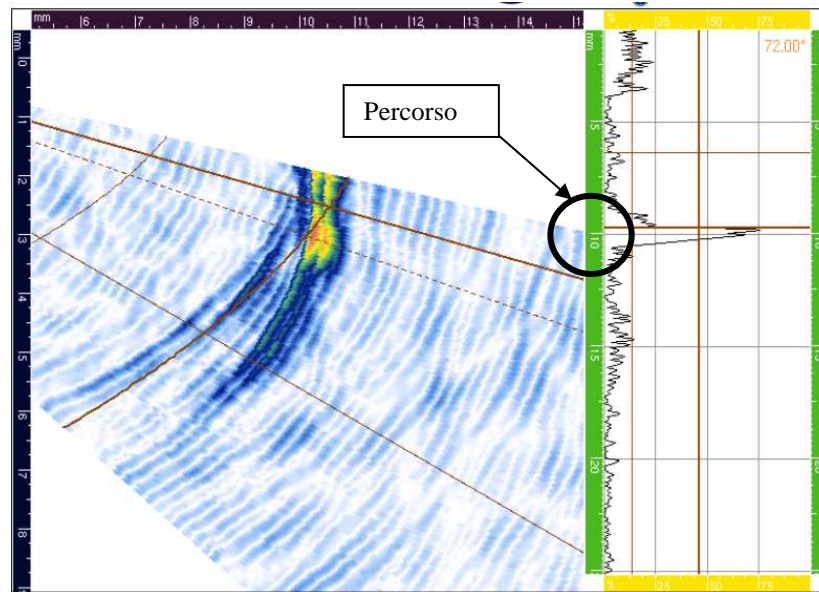


Fig. 4.4 S-scan e A-scan del difetto fresata 3 mm

4.2 Risultati difetti artificiali

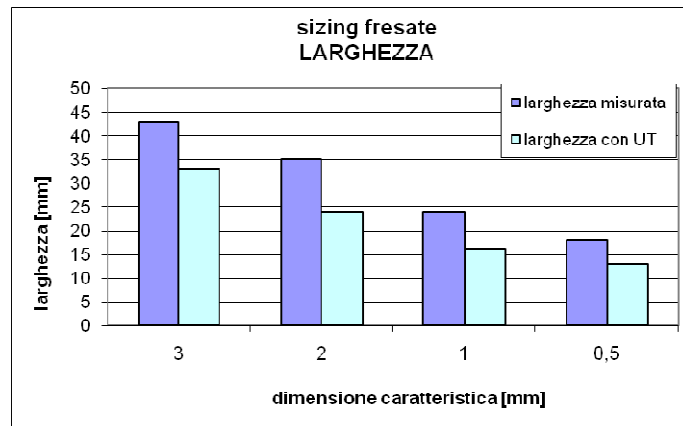
Con i dati relativi ad ogni configurazione di dimensionamento adottata costruiremo degli istogrammi grazie ai quali confrontare l'effettiva dimensione del difetto con quella stimata utilizzando gli ultrasuoni.

4.2.1 RDG 500 sonda ATM45-4 larghezza e dimensione caratteristica con metodo 6 dB.

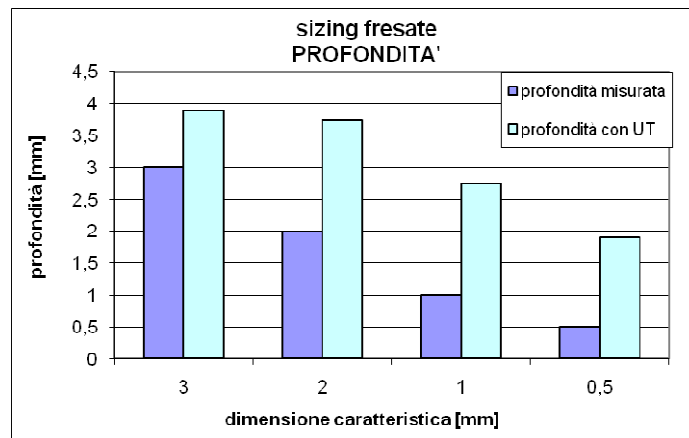
Nelle tab. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 si trascrivono sia i valori delle dimensioni effettive sia quelli ricavati con il metodo 6 dB, dopodiché si metteranno a confronto mediante istogrammi (fig. 4.5a,b 4.6a,b 4.7a,b 4.8).

FRESATE		metodo ± 6 dB				
profondità [mm]	largh. [mm]	largh. con UT [mm]	percorso max [mm]	avanti [mm]	indietro [mm]	prof. stimata [mm]
3	43	33	85,5	83,7	91,5	3,9
2	35	24	84,67	82,84	90,32	3,74
1	24	16	83,06	81,69	87,2	2,755
0,5	18	13	83,42	82,13	85,92	1,895

Tab. 4.1



(a)

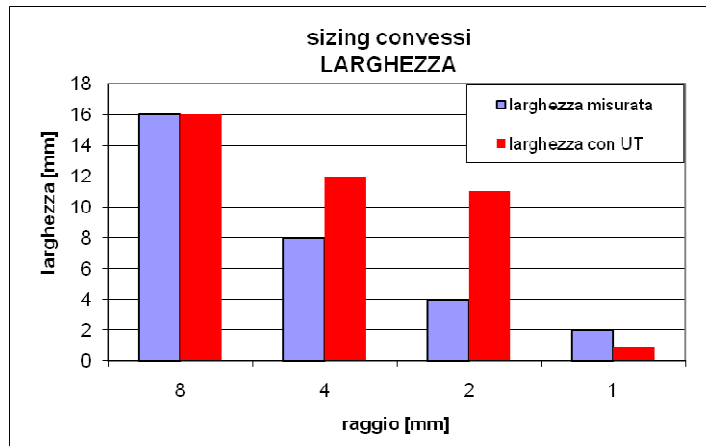


(b)

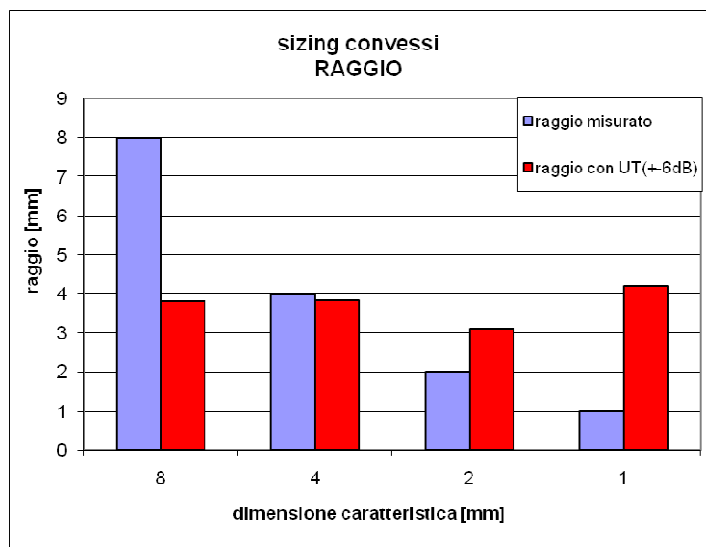
Fig. 4.5 sizing fresate larghezza (a),profondità (b)

CONVESSI				
raggio [mm]	largh. [mm]			
8	16			
4	8			
2	4			
1	2			
metodo ± 6 dB				
largh. con UT [mm]	percorso max [mm]	avanti [mm]	indietro [mm]	raggio stimato [mm]
16	87,16	84,32	91,92	3,8
12	86,2	84,16	91,82	3,83
11	87,57	84,57	90,79	3,11
1	85,03	83,35	91,75	4,2

Tab. 4.2



(a)

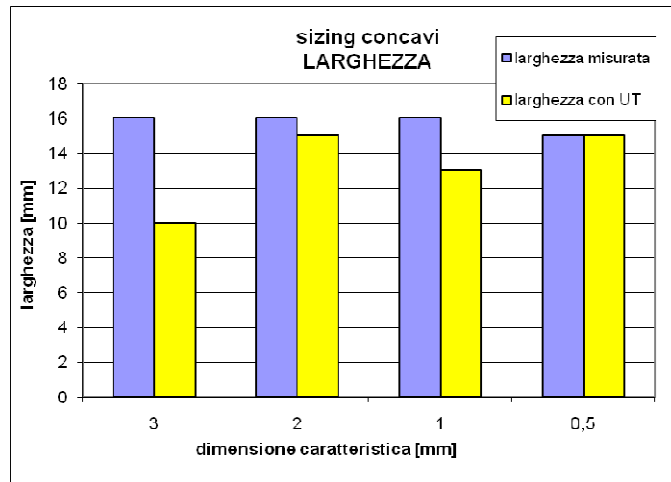


(b)

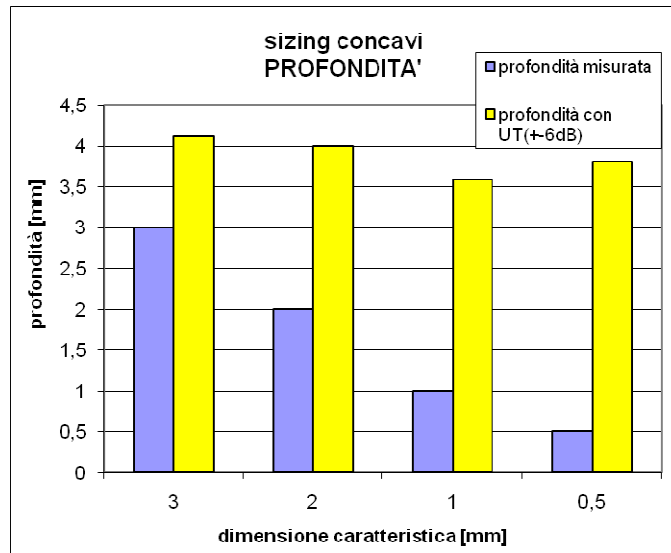
Fig.4.6 sizing convessi larghezza (a), raggio (b)

CONCAVI					
profondità [mm]	largh. [mm]				
3	16				
2	16				
1	16				
0,5	15				
metodo ± 6 dB					
largh. con UT [mm]	percorso max [mm]	avanti [mm]	indietro [mm]	prof. stimata [mm]	
10	87,53	84,44	92,65	4,105	
15	87,22	84,38	92,36	3,99	
13	86,54	83,91	91,07	3,58	
15	85,92	83,24	90,84	3,8	

Tab. 4.3



(a)



(b)

Fig. 4.7 sizing convessi larghezza (a), raggio (b)

FORI	
diametro [mm]	D [mm]
6	22
4	20
3	25

Tab. 4.4

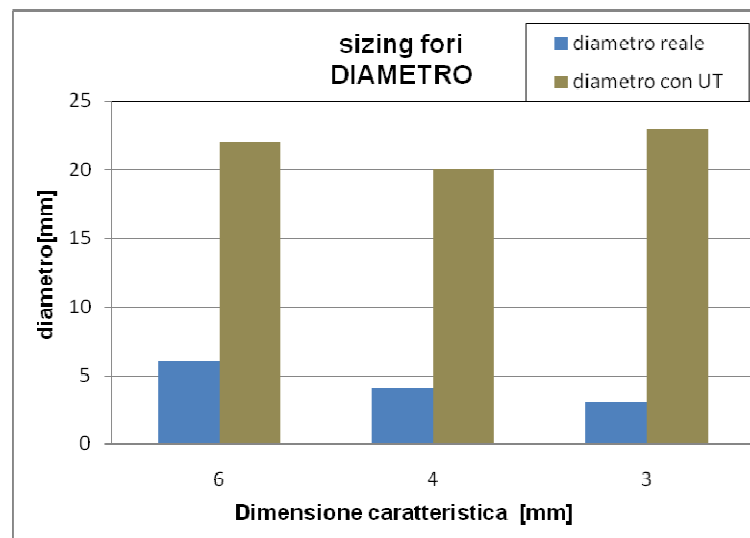


Fig. 4.8 sizing diametro fori

Dall'osservazione dei grafici risulta difficile dare un giudizio definitivo sull'efficacia del metodo per la stima dell'estensione dei difetti considerati.

Sicuramente possiamo affermare che:

- il metodo non è assolutamente idoneo per quanto riguarda la stima dei diametri dei fori (superficie riflettente curva) quindi nel seguito della trattazione non verranno più considerati.
- anche se l'errore commesso è rilevante, per tutti gli altri difetti o meglio per quelli di dimensioni maggiori la stima delle larghezze segue pressoché l'andamento delle dimensioni effettive.
- per la profondità i risultati sono ancor più insoddisfacenti.

Vediamo le ragioni del fallimento del metodo:

innanzitutto questo metodo è descritto in letteratura come solo da usare se la risposta UT del difetto è sostanzialmente uniforme su tutta la superficie riflettente, è adatto quindi per il dimensionamento delle larghezze dei difetti di grandezza simile o maggiore di quella del fascio ultrasonoro usato per individuarli; nel nostro caso questa situazione è verificata per quasi tutti i difetti tranne nei fori e nei convessi di raggio 4,2,1 millimetri (nell'indagine in secondo percorso la larghezza del fascio raggiunge i 20 millimetri).

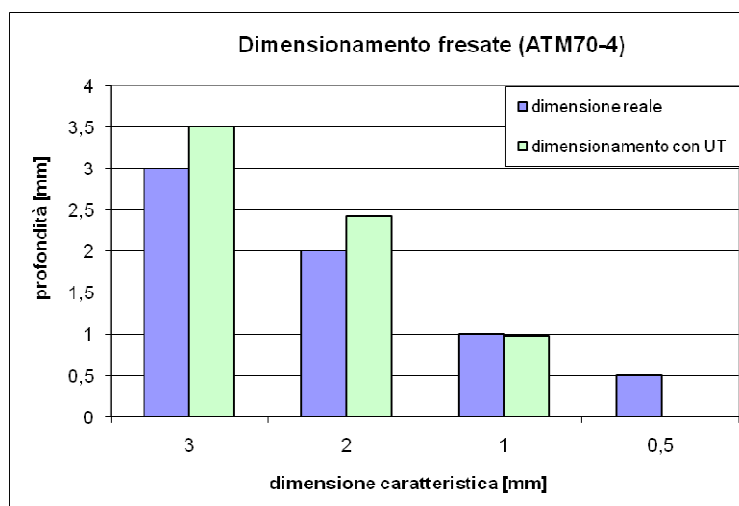
Vale quindi lo stesso discorso per le profondità essendo tutte di gran lunga inferiori alla dimensione del fascio che raggiunge gli 11 millimetri di altezza (riferendoci alla semi-altezza se consideriamo la riflessione nel corner del difetto).

4.2.2 RDG 500 sonda ATM70-4 dimensione caratteristica con metodo diffrazione.

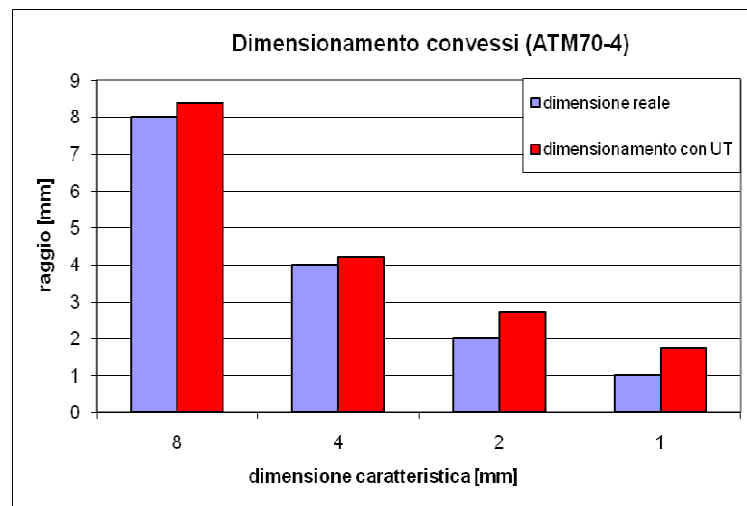
Questo metodo, come si osserva dagli istogrammi di confronto (fig. 4.9a,b,c), risulta essere abbastanza efficace per la stima della profondità anche se per i difetti per così dire “piccoli” i risultati degli A-scan vanno interpretati con attenzione infatti avendo a che fare con percorsi brevi (tab. 4.5) il fascio interagisce stranamente con la superficie del riflettore colpita (nell’A-scan notiamo molto rumore nelle vicinanze dell’eco significativo), per questo motivo non si è riuscita a stimare la profondità del difetto fresata da 0,5 millimetri.

FRESATE			
dimensione reale [mm]	80% [dB]	percorso p [mm]	dim. Calcolata = $p \cdot \sin 20^\circ$
3	71	10,08	3,447563045
2	69	6,52	2,229971334
1	65,5	3,13	1,070523049
0,5	not detected	-----	-----
CONVESSI			
dimensione reale [mm]	80% [dB]	percorso p [mm]	dim. Calcolata = $p \cdot \sin 20^\circ$
8	76	24,48	8,372653109
4	76	12,29	4,203427561
2	74,5	7,99	2,732740945
1	80	5,08	1,737462328
CONCAVI			
dimensione reale [mm]	80% [dB]	percorso p [mm]	dim. Calcolata = $p \cdot \sin 20^\circ$
3	71	10,54	3,604892311
2	67,5	6,48	2,216290529
1	75	5,4	1,846908774
0,5	65	1,45	0,495929208

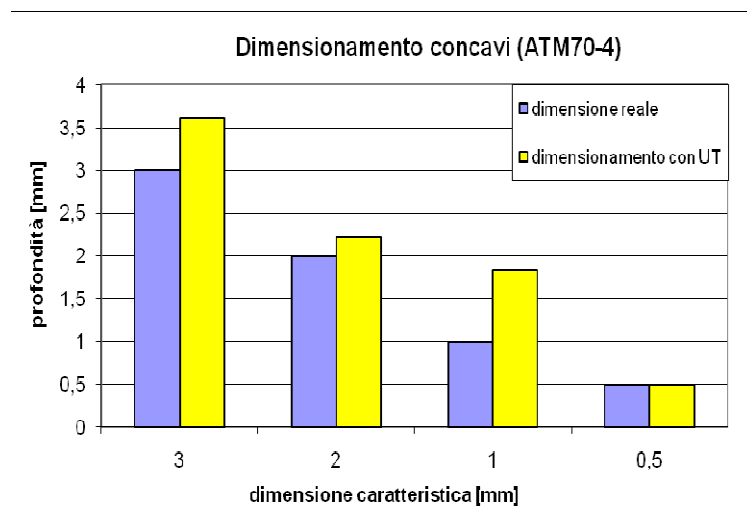
Tab. 4.5



(a)



(b)



(c)

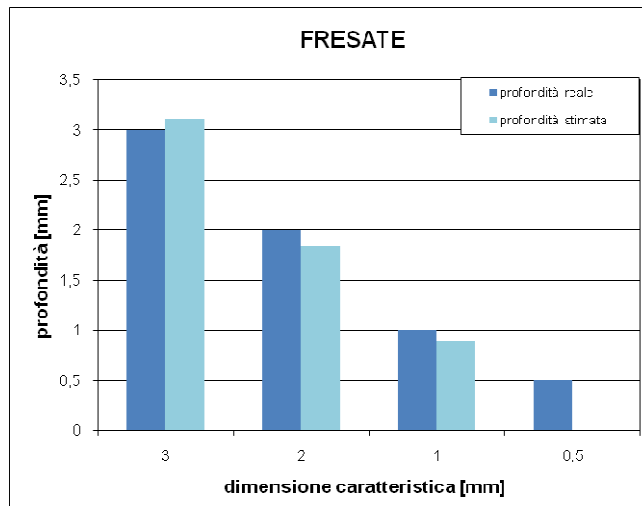
Fig. 4.9 stima profondità fresate (a), convessi (b), concavi (c)

4.2.3 Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 45°

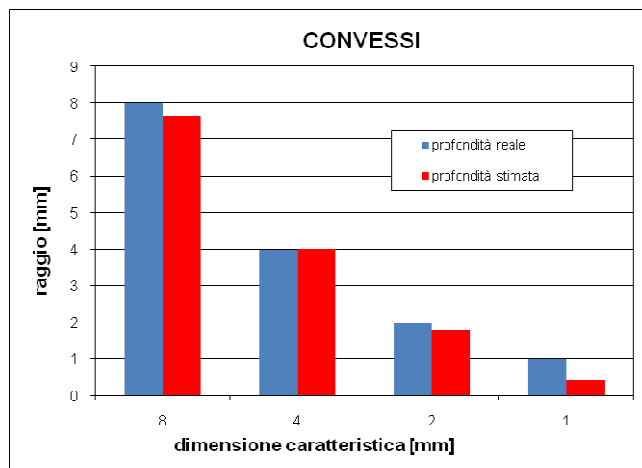
Con questo metodo in combinazione al rilevatore ultrasonoro Harfang X-32 si nota una maggior accuratezza delle profondità stimate (vedi fig. 4.10a,b,c) ad eccezione di pochi difetti (fresata 0,5 mm , concavi 1 e 0,5 mm) per i quali è difficile distinguere separatamente i due echi nella visualizzazione S-scan (visualizziamo un'unica macchia cromatica relativa alla somma dei contributi di riflessione nel corner e di rifrazione sulla punta del difetto).

FRESATE			
dimensione reale [mm]	profondità corner [mm]	profondità diffraz [mm]	dimensione stimata [mm]
3	88,87	85,75	3,12
2	89,15	87,31	1,84
1	89,34	88,45	0,89
0,5	88,92	-----	-----
CONVESSI			
dimensione reale [mm]	profondità corner [mm]	profondità diffraz [mm]	dimensione stimata [mm]
8	88,58	80,94	7,64
4	88,8	84,76	4,04
2	88,97	87,17	1,8
1	88,52	88,09	0,43
CONCAVI			
dimensione reale [mm]	profondità corner [mm]	profondità diffraz [mm]	dimensione stimata [mm]
3	89,7	86,67	3,03
2	89,53	87,61	1,92
1	89,41	-----	-----
0,5	-----	-----	-----

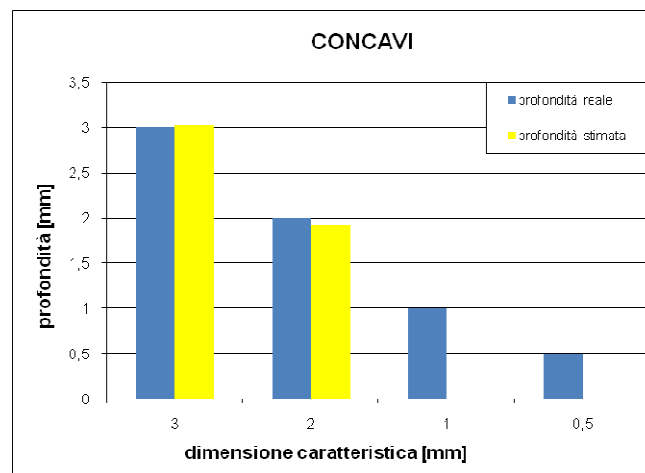
Tab. 4.6



(a)



(b)



(c)

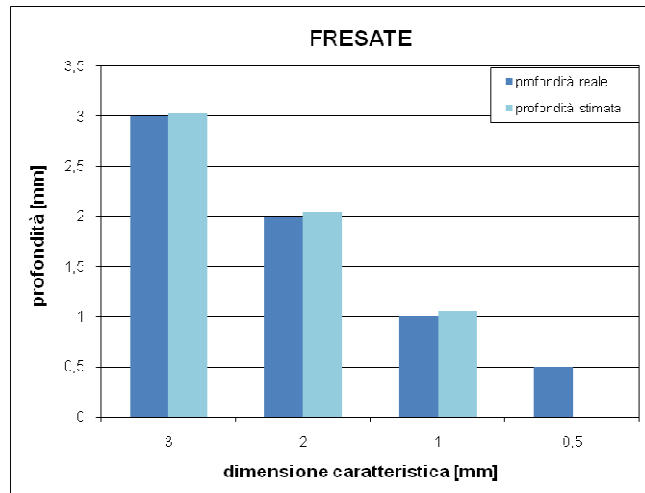
Fig. 4.10 stima profondità con rilevatore Harfang x-32 fresate (a), convessi (b), concavi (c) con metodo diffrazione e a 45°

4.2.4 Harfang X-32 sonda phased array dimensione caratteristica con metodo diffrazione a 74°

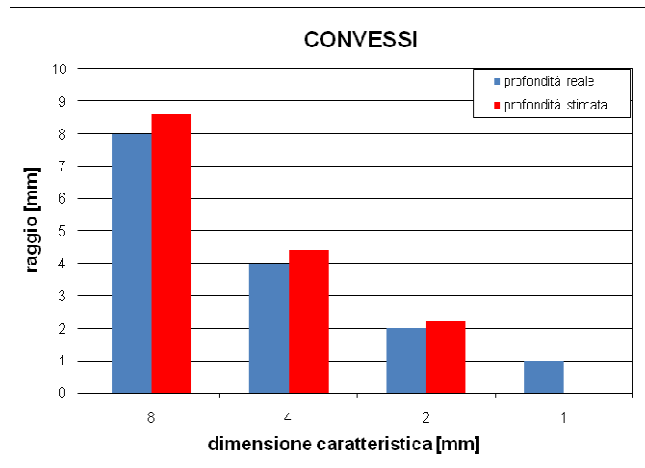
Come per la centralina Gilardoni questo metodo risulta il più efficiente per la stima della profondità (fig. 4.11a,b,c) anche se si riscontrano i soliti problemi per i difetti con dimensioni minori e uguali a 1mm (difficile distinguere l'eco di risposta diffratto tra tanti echi e rumore presente).

FRESATE			
dimensione reale [mm]	risposta [dB]	percorso [mm]	dimensione stimata [mm]
3	28	9,8	3,028366545
2	34	6,62	2,045692503
1	33,5	3,42	1,056838121
0,5	-----	-----	-----
CONVESSI			
dimensione reale [mm]	risposta [dB]	percorso [mm]	dimensione stimata [mm]
8	35	27,88	8,615393803
4	36	14,21	4,39113149
2	39	7,09	2,19093049
1	-----	-----	-----
CONCAVI			
dimensione reale [mm]	risposta [dB]	percorso [mm]	dimensione stimata [mm]
3	27,5	9,39	2,901669577
2	33	6,75	2,085864712
1	34,52	3,53	1,09082999
0,5	-----	-----	-----

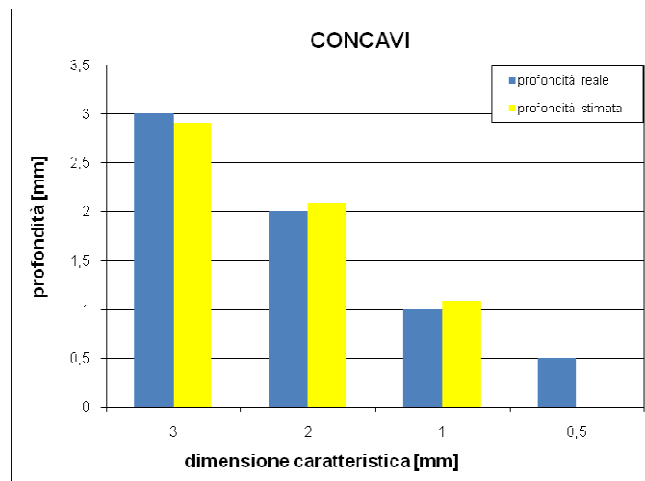
Tab. 4.7



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.11 stima profondità con rilevatore Harfang x-32 fresate (a), convessi (b), concavi (c) con metodo diffrazione e a 72°

4.3 Risultati difetti naturali cricche da fatica

Con gli stessi metodi descritti nel precedente paragrafo si prova ora a caratterizzare in termini di larghezza (intese come lunghezza superficiale) e profondità (in questo caso supponendo la cricca di fatica semi-ellittica si riferisce alla massima profondità) le cricche propagate nei due assili sottoposti alla prova di propagazione sul banco dinamico (assile 14 e 19).

4.3.1 RDG 500 sonda ATM45-4 metodo 6dB larghezza e profondità.

Come già visto per i difetti artificiali il metodo 6 dB non è il più idoneo per il dimensionamento della larghezza (fig. 4.12), sembra invece eseguire una buona stima della profondità a valori bassi per poi avere un andamento pressoché piatto (fig. 4.13).

controllo n°	prof. stimata excel [mm]	metodo 6 dB prof. [mm]	largh. misurata [mm]	metodo 6 dB largh. [mm]
controllo 1	2,38	3,13	4,55	15
controllo 2	3,42	3,28	6,99	14
controllo 3	4,22	3,55	8,68	16
controllo 4	5,22	3,55	10,8	16
controllo 5	6,77	3,8	14,15	15
controllo 6	8,55	3,9	18,09	15
controllo 7	9,51	3,76	20,25	15
controllo 8	11,35	4,3	24,47	16

Tab. 4.8

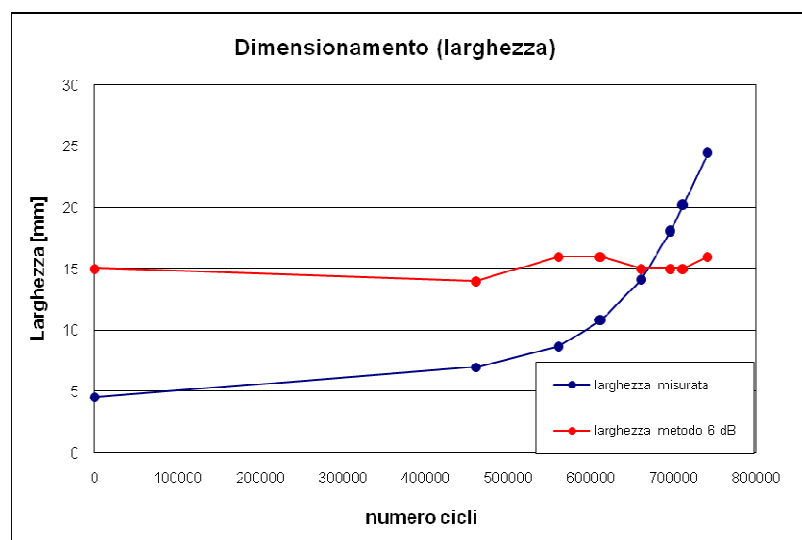


Fig.4.12

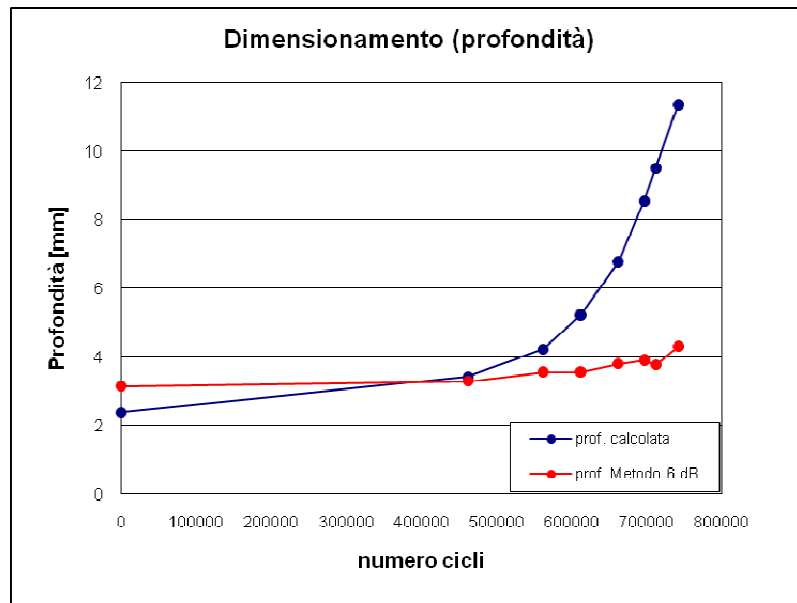


Fig. 4.13

4.3.2 RDG 500 sonda ATM70-4 metodo diffrazione profondità

Dal grafico (fig. 4.14) possiamo osservare che per valori di profondità bassi (fino a 4mm) abbiamo un andamento che ricalca quasi perfettamente la curva relativa alla stima della profondità calcolata in maniera analitica (equazione ellisse), dopodiché si perde questa tendenza (anche se ha un andamento non più piatto come nel caso 6 dB, ma crescente).

controllo n°	risposta max 80% [dB]	percorso [mm]	profondità calcolata [mm]
controllo 1	81,5	7,57	2,589092485
controllo 2	77	9,21	3,15000552
controllo 3	80	12,68	4,336815417
controllo 4	80	13,92	4,760920395
controllo 5	76	14,12	4,829324424
controllo 6	81,5	15,83	5,414178869
controllo 7	84	16,6	5,677534379
controllo 8	91	17,26	5,903267674

Tab. 4.9

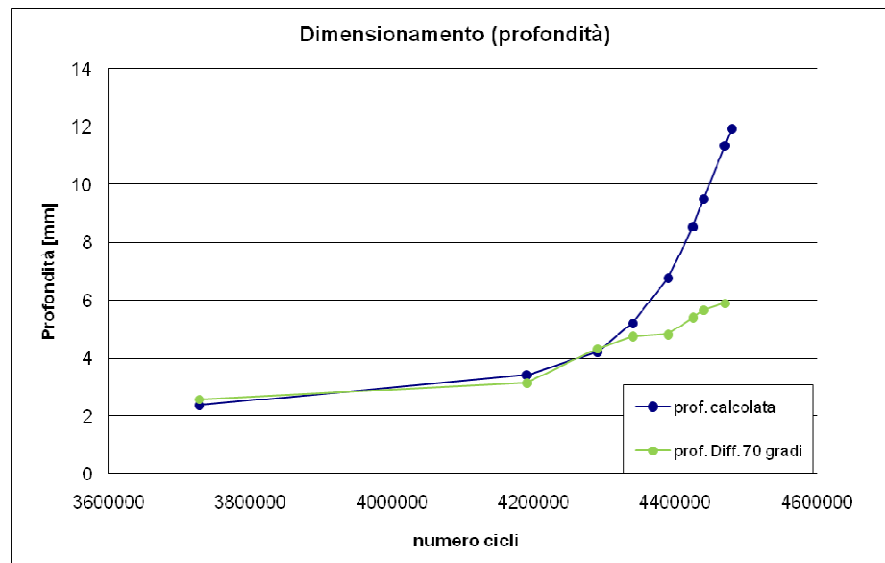


Fig. 4.14

4.3.3 Harfang X-32 sonda phased array metodo diffrazione a 45° profondità.

A differenza dei risultati ottenuti per i difetti artificiali risulta molto difficile individuare gli echi di diffrazione relativi a ogni step di monitoraggio della propagazione della cricca; questo è forse dovuto alla conformazione delle superfici sia riflettente sia quella che dovrebbe restituirci l'eco diffratto molto diverse da quelle dei difetti artificiali più definite e precise.

4.3.4 Harfang X-32 sonda phased array metodo diffrazione a 74° profondità.

Anche con il rilevatore Harfang notiamo che le migliori risposte si ottengono con il metodo diffrazione in primo percorso anche se si è ancora lontani dalla curva stimata con il calcolo analitico (fig. 4.15).

controllo n°	risposta max [dB]	percorso [mm]	profondità calcolata [mm]
controllo 1	non rilevata		
controllo 2 (al 70% FS)	35	9,25	2,534122773
controllo 3	35	11,44	3,134093462
controllo 4	35	15,5	4,24636789
controllo 5	35	14,47	3,964189894
controllo 6	35	21,6	5,917519124
controllo 7	41	23,24	6,366812242
controllo 8	41	25,23	6,911991088

Tab. 4.10

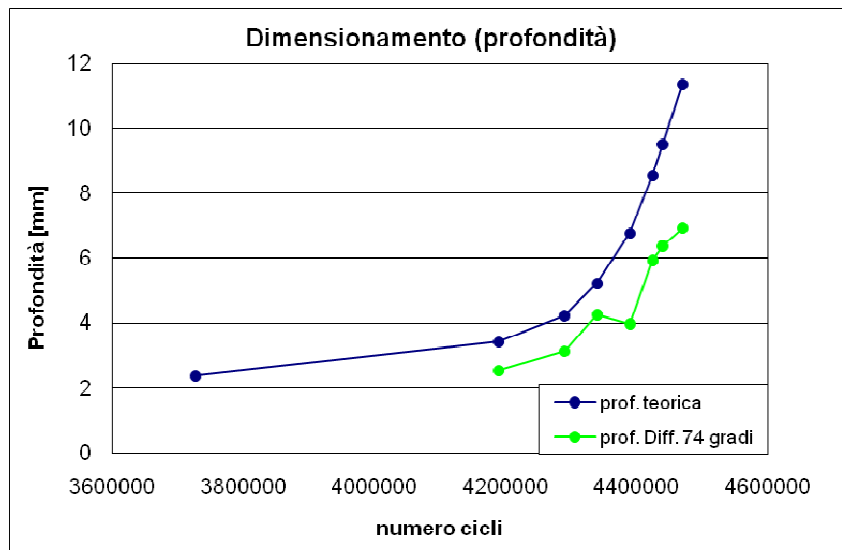


Fig. 4.15

Mettendo a confronto in un unico grafico (fig. 4.16) gli andamenti dei metodi usati per la stima della profondità possiamo osservare quale sia il più adatto ovvero quello che sembra seguire meglio la curva ricavata analiticamente;

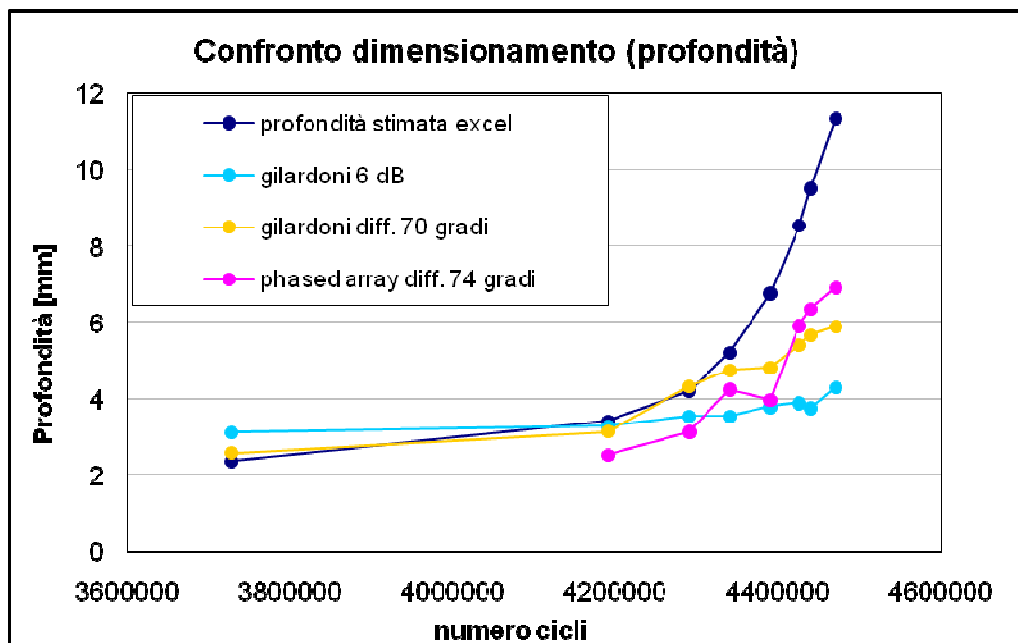


Fig. 4.16 confronto metodi dimensionamento profondità cricca assile 14

il metodo che sfrutta il fenomeno della diffrazione risulta essere il più adeguato per la stima della profondità anche se i risultati sono insoddisfacenti .

Il fallimento parziale di queste prove può essere causato da diversi fattori:

- superficie della cricca in termini di rugosità e definizione geometrica diversa da quella dei difetti artificiali.
- adesione dei lembi della cricca con eventuale formazione di ossidi
- manualità dell'operatore.

Per il secondo assile (19) invece si è scelto di tralasciare il dimensionamento della larghezza della cricca propagata dai microfori, inoltre non è stato possibile eseguire una stima della profondità con il metodo della diffrazione per i seguenti motivi: a causa delle proprie dimensioni (inferiori ai 2 mm) e alla posizione sfavorevole per l'accoppiamento con la sonda (i microfori si trovano su una superficie raccordata) per riuscire a visualizzare l'eco di risposta diffratto di una cricca così piccola bisogna avvicinarsi molto con la sonda riscontrando i problemi di accoppiamento dello zoccolo con la superficie di transizione di conseguenza una difficile interpretazione della scansione visualizzata dalle strumentazioni.

Capitolo 5

Simulazione numerica

Grazie alla continua evoluzione dei moderni mezzi di calcolo abbiamo la possibilità di effettuare simulazioni numeriche di tecniche ormai consolidate dalla pratica come i controlli non distruttivi.

In particolare sono disponibili in commercio pacchetti software per la simulazione delle modalità di propagazione degli ultrasuoni che sono di grande aiuto all'operatore soprattutto prima di effettuare l'ispezione vera e propria, riuscendo così ad avere un'idea dei risultati attesi.

Nel nostro caso le simulazioni UT sono state eseguite mediante il software dedicato CIVA[®] 9.1.

Il modulo di simulazione UT in questione è costituito da due parti fondamentali, la prima denominata UT modeling / Beam computation si occupa della modellazione del campo ultrasonoro irradiato dal trasduttore nel pezzo in esame mentre la seconda riguarda le interazioni tra fascio e difetto UT modeling / Defect response. Questi due moduli riescono a simulare completamente le procedure dell'analisi ultrasonora comprendendo un vasto range di sonde, pezzi in esame e difetti [18].

5.1 Descrizione della modellazione adottata

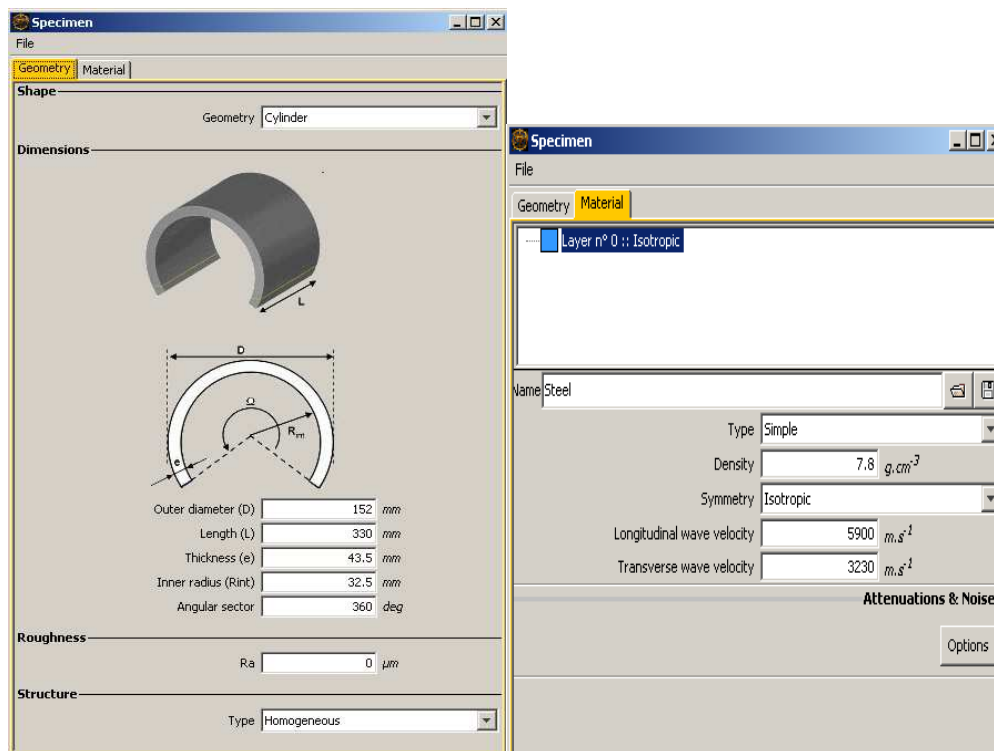
Nell'ottica di verificare l'efficacia del software si sono simulate le risposte dei difetti artificiali analizzati in primo percorso con i rilevatori RDG 500 e Harfang X-32. Di seguito sono riportati i passi seguiti per la modellazione delle due situazioni che si differenziano soltanto nel tipo di sonda e zoccolo utilizzati nell'ispezione.

La modellazione prevede il settaggio di sette principali moduli (fig.5.1) tra cui scelta del componente in esame, sonda, tipo di test, settaggio dell'array, difetti, definizione del campo di calcolo e infine il lancio dell'analisi.



Fig. 5.1 schermata principale CIVA

Si comincia con la definizione della geometria, materiale e caratteristiche riguardanti la velocità di propagazione del suono nel pezzo in esame (fig. 5.2a,b): pezzo cilindrico di diametro 152 e foro barenato di 65 millimetri in acciaio ($V_l=5920$ m/s e $V_t=3230$ m/s).



(a)

(b)

Fig. 5.2 definizione geometria (a) e materiale (b) del pezzo da testare

Il secondo passo prevede la scelta del tipo di sonda: geometria, dimensioni e caratteristiche dei trasduttori e degli zoccoli per entrambe le strumentazioni adottate.

Il primo rivelatore (Gilardoni RDG 500) è affiancato alla sonda ATM45-4 la quale sfrutta le caratteristiche piezoelettriche di un cristallo monolitico rettangolare di dimensioni 8x9 millimetri (fig. 5.3) ed è inserita in un supporto in plexiglass ricavato appositamente per l'accoppiamento con la superficie interna del pezzo in esame (fig. 5.4).

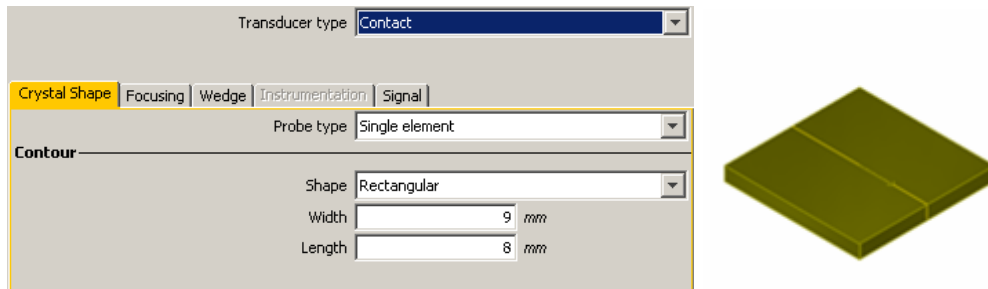


Fig. 5.3 trasduttore sonda ATM45-4

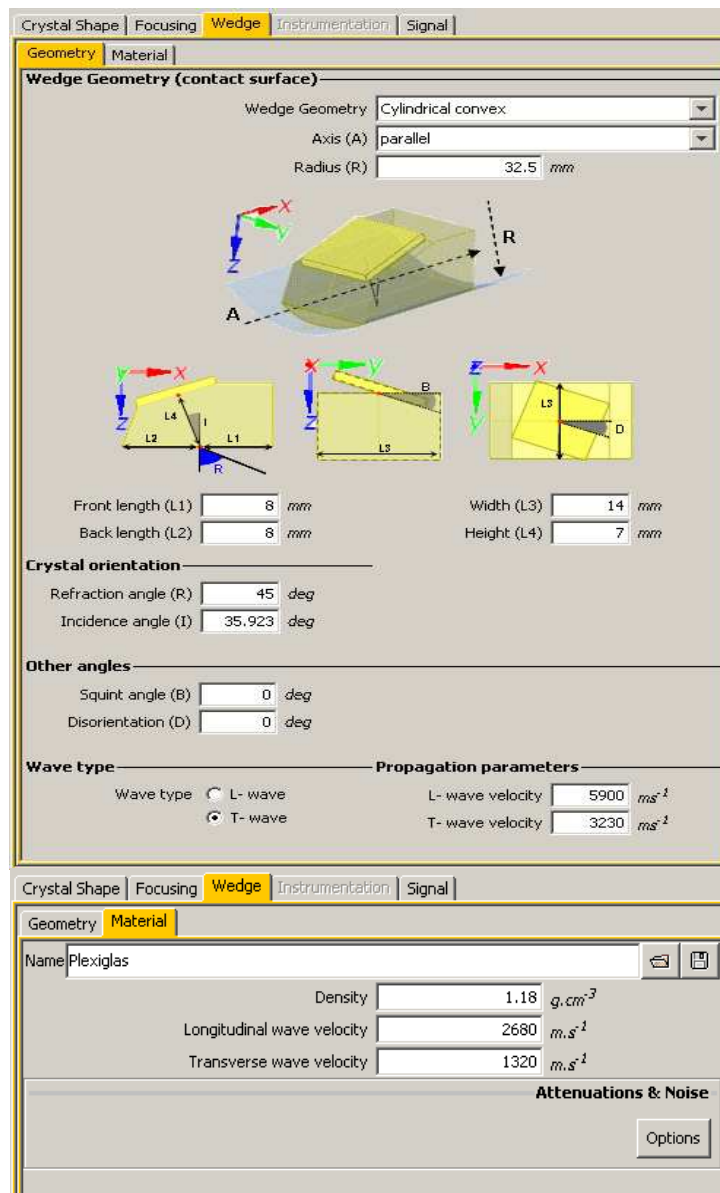


Fig. 5.4 dimensioni e caratteristiche zoccolo

Il secondo rivelatore (Harfang X-32) invece sfrutta la tecnologia del trasduttore phased array 32 cristalli disposti linearmente con passo 0.8mm e dimensioni del singolo cristallo 0.762 x 12 mm, anche questa sonda è inserita in uno zoccolo simile al precedente (fig. 5.5)

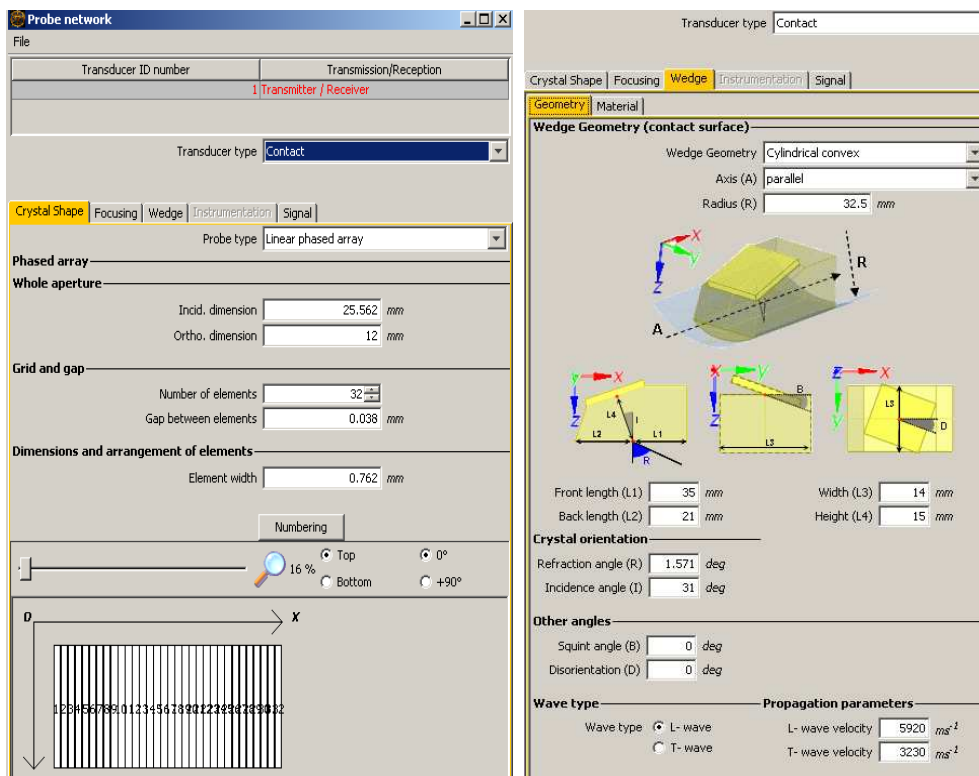
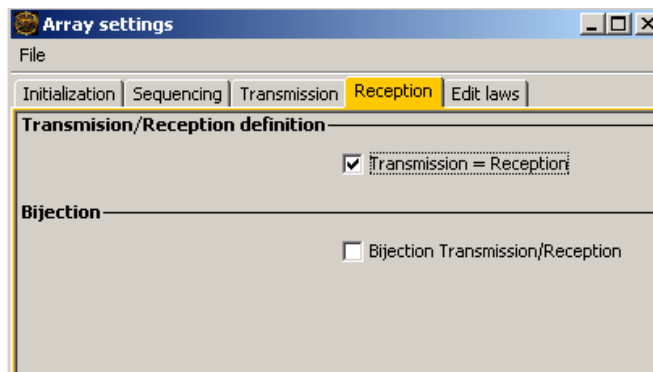


Fig. 5.5 trasduttore e zoccolo sonda phased array

Questo tipo di sonda prevede un'ulteriore operazione di settaggio riguardante le caratteristiche di trasmissione delle onde e il settore angolare usato per la scansione (fig. 5.6).



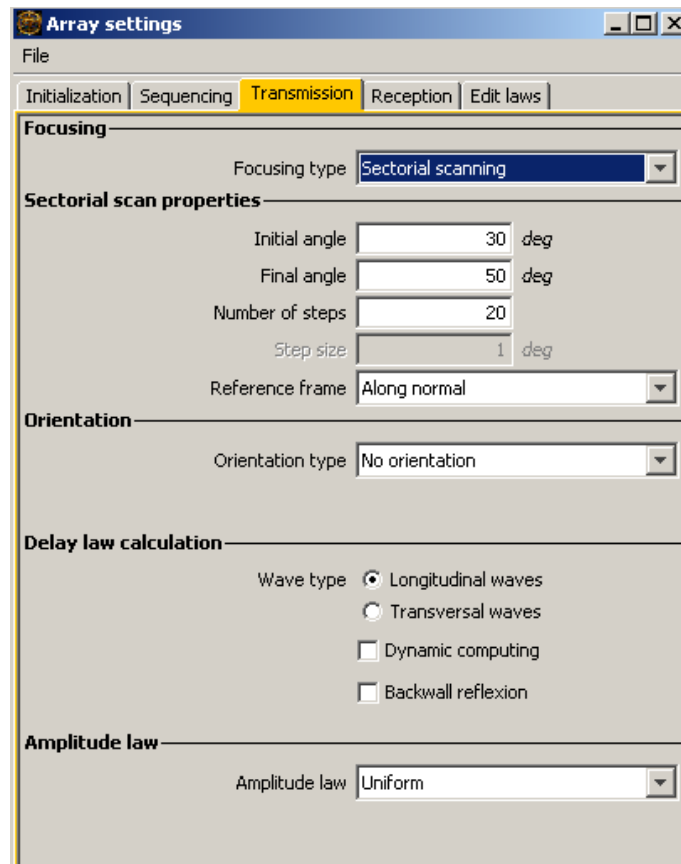


Fig. 5.6 settaggio phased array

Sotto la voce “inspection” si settano le modalità con cui viene eseguita l’indagine ultrasonora: innanzitutto si sceglie la configurazione con cui avverrà il controllo ovvero dall’interno e facendo scorrere la sonda parallelamente all’asse di rivoluzione del solido in esame (fig. 5.7), successivamente si impostano la posizione di partenza della sonda (fig. 5.8) le sostanze che intervengono nell’accoppiamento tra la sonda e il pezzo, che non sono altro che grasso e aria (fig. 5.9), e gli step di avanzamento della sonda (fig.5.10)

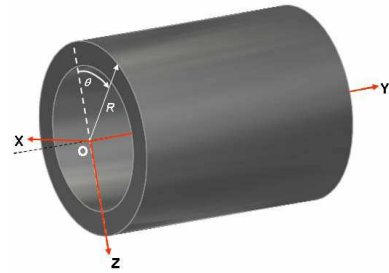
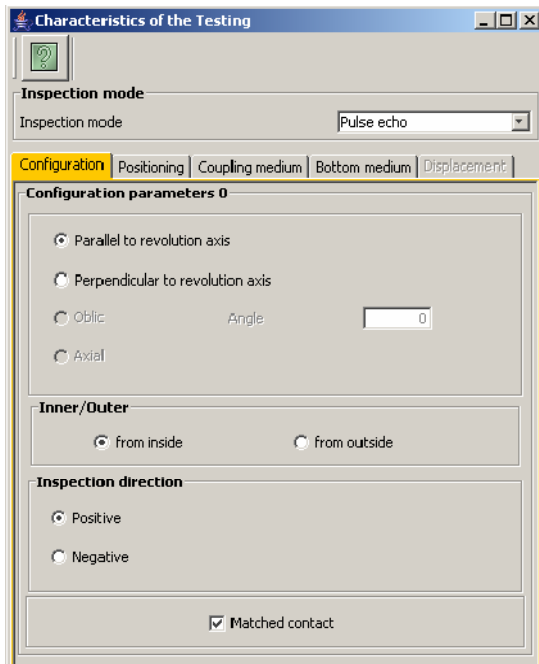


Fig. 5.7 configurazione del controllo

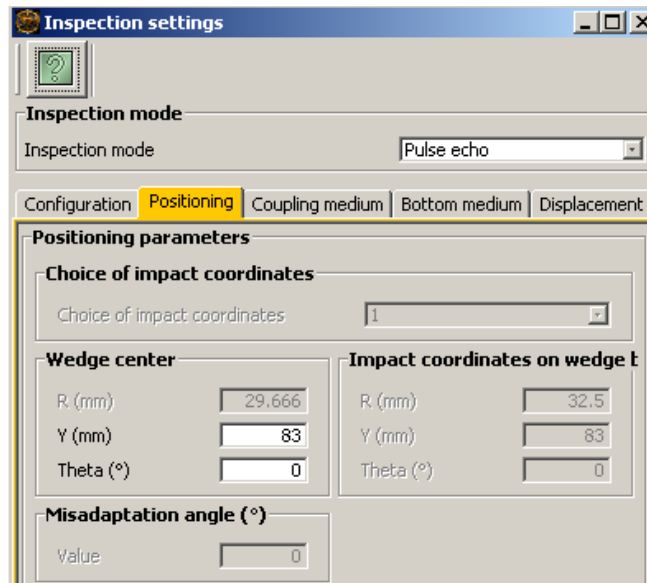


Fig. 5.8 posizione di partenza della sonda

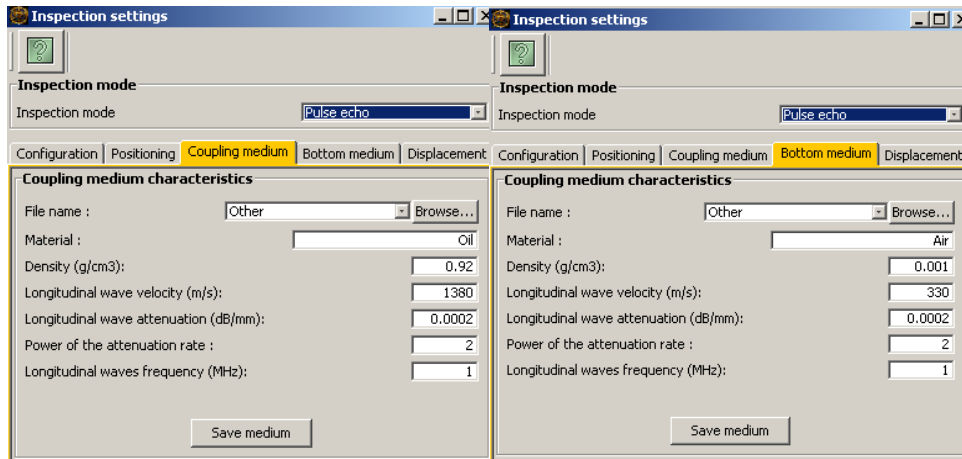


Fig. 5.9 sostanze per l' accoppiamento

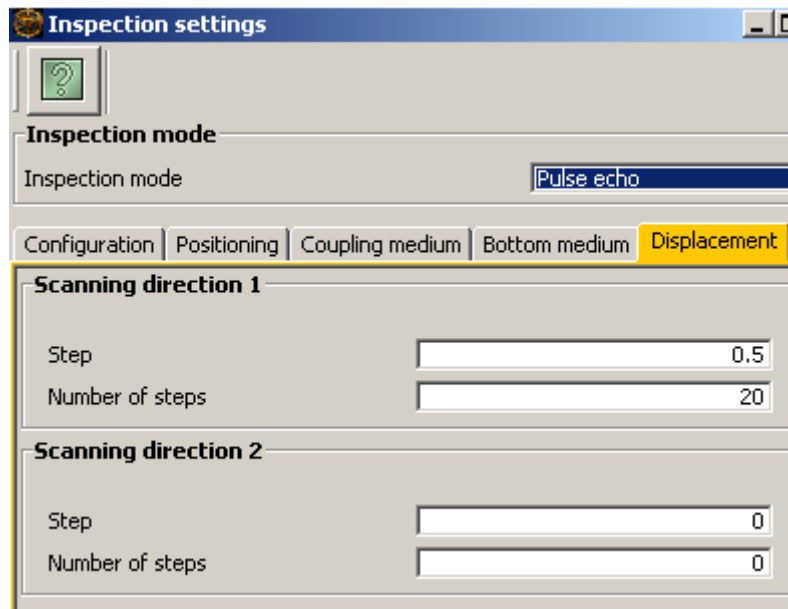


Fig. 5.10 step di avanzamento della sonda

La modellazione dei difetti presenti nel pezzo in esame si esegue aprendo il modulo dedicato “flaws”, il software ha già in memoria alcune tipologie di forme utili al nostro caso, per esempio la forma rettangolare e semiellittica rispettivamente usate per simulare le fresate e gli intagli convessi, mentre le forme mancanti vengono create come disegni CAD e richiamati successivamente (intagli concavi) si completa il modulo inserendo le dimensioni (fig. 5.11) e la posizione occupata (fig.5.12).

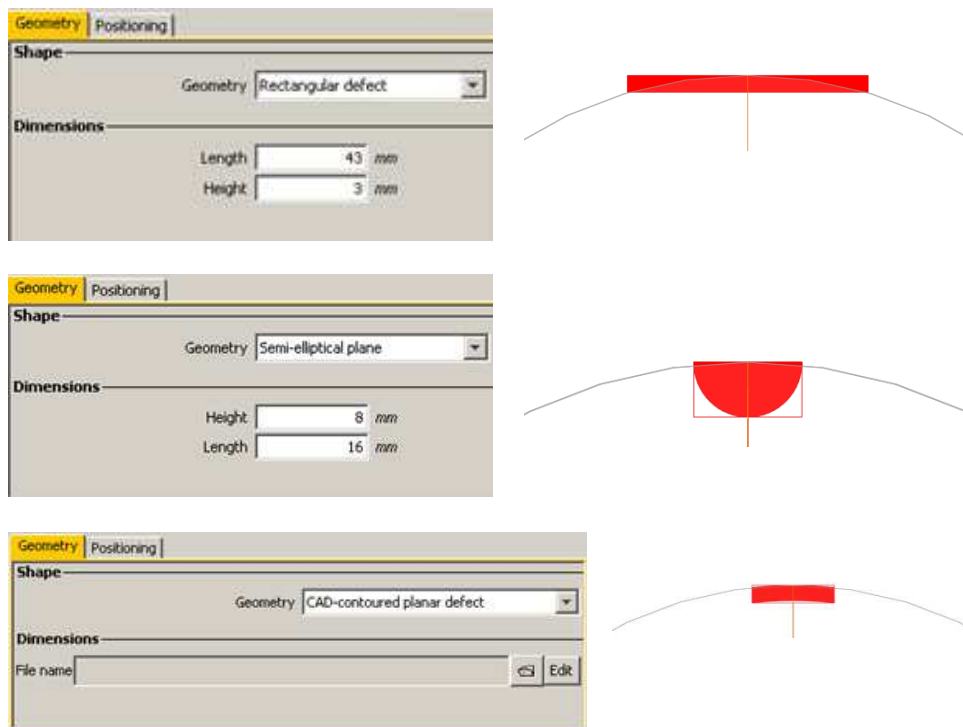


Fig. 5.11 forma e dimensioni dei difetti analizzati

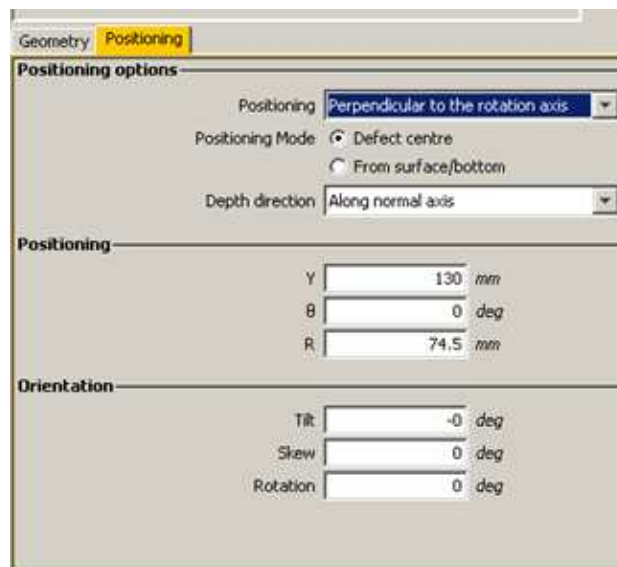


Fig. 5.12 posizionamento

Per ottenere le simulazioni delle risposte dei difetti artificiali analizzati si deve eseguire un ultimo passaggio che consiste nel settare i parametri di cinque campi

(fig. 5.13) riguardanti la definizione dell'area di calcolo che interessa la propagazione del fascio ultrasonoro.



Fig. 5.13

Ci soffermiamo brevemente sulla voce “incident field” dove l’operatore può scegliere tra diversi metodi di calcolo del fascio: parametric field (del quale non vedremo l’ applicazione), stored beam file e on-line beam computation. Selezionando “stored beam file” si sceglie di usare un fascio precedentemente calcolato ovvero un file di output del modulo Beam computation appositamente creato per una definita posizione della sonda in modo da interagire adeguatamente con il difetto, l’altra voce “on-line beam computation” è riferita ad un fascio calcolato, per ogni posizione della sonda, automaticamente dal software (fig. 5.14).

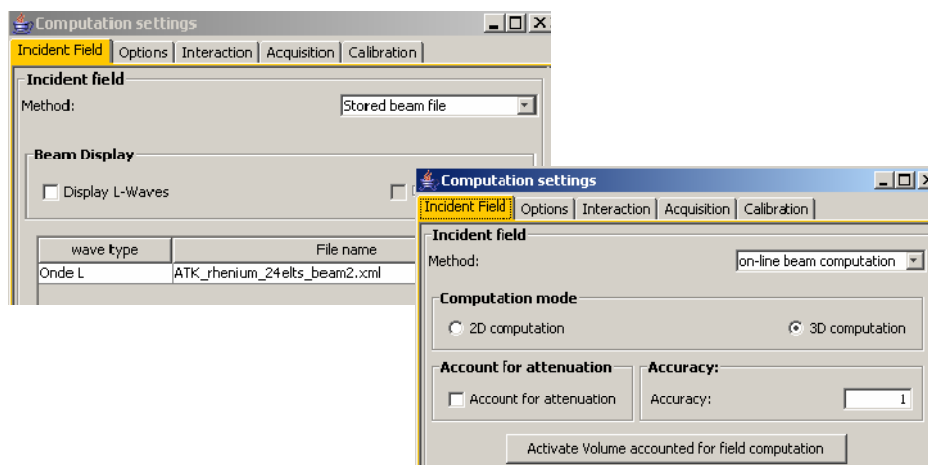


Fig. 5.14

Le restanti voci sono: “options” dove si settano i parametri relativi alla modalità di calcolo e discretizzazione dell’area del fascio (2D o 3D), tipo di onde incidenti (longitudinali e trasversali) e tipo di ispezione (direct, half skip e skip); “interactions” che consente la scelta del tipo di interazione con il difetto (Kirchhoff, Geometrical Theory of Diffraction); “acquisition” si specificano le finestre temporali e le forme d’onda da visualizzare mentre “calibrations” riguarda il settaggio dei valori di riferimento di ampiezza del segnale (fig. 5.15).

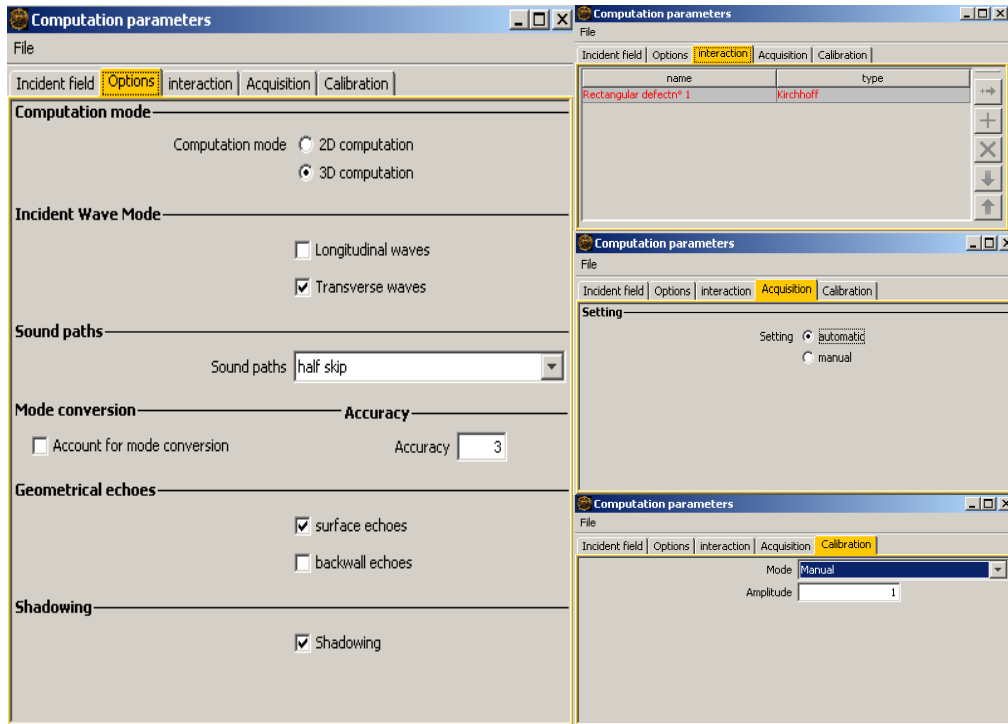


Fig. 5. 15

5.2 Defect response in primo percorso dei difetti artificiali

Dopo aver completato tutti i moduli di settaggio si fa partire la simulazione, il software come se fosse un'ispezione vera e propria offre la possibilità di risalire agli A-scan relativi a ogni step di avanzamento della sonda (fig. 5.16) oltre ad un altro tipo di visualizzazione in cui è presente un'unica "macchia" multi cromatica relativa all'intera scansione dalla quale si ha un'idea della risposta massima in base ad una scala cromatica (fig. 5.17).

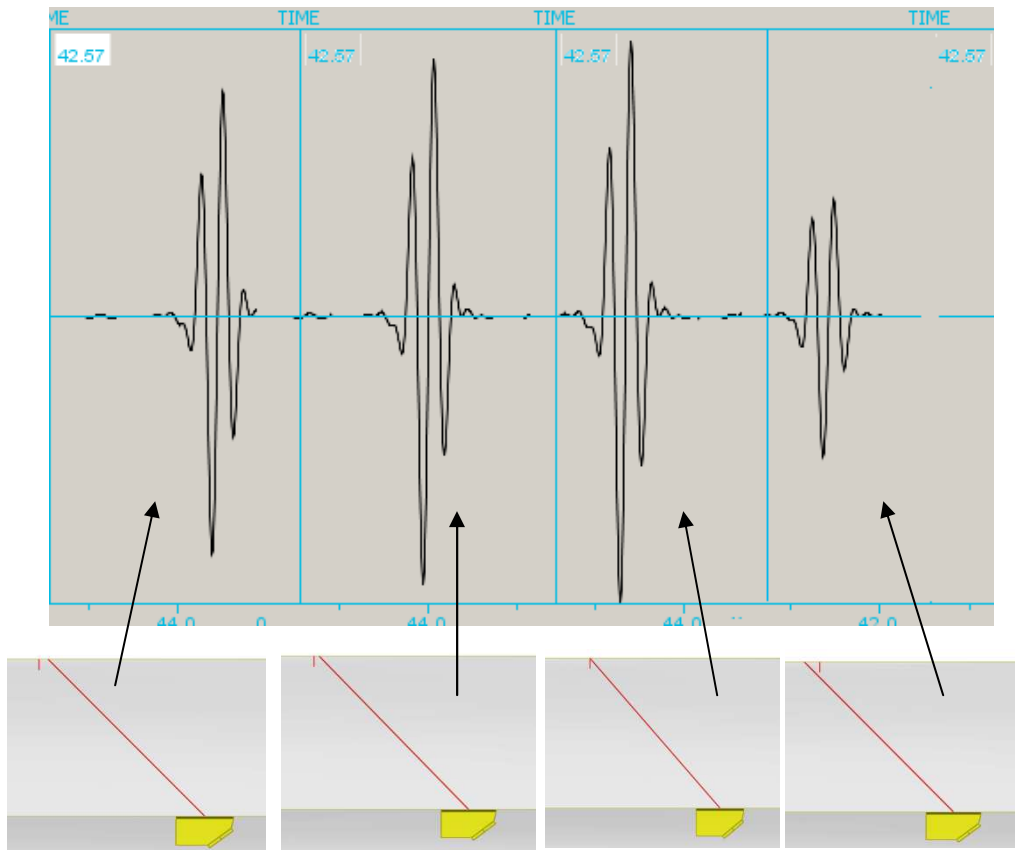


Fig. 5.16 esempio di A-scan (fresata 3 mm) relativi ad ogni step di avanzamento della sonda

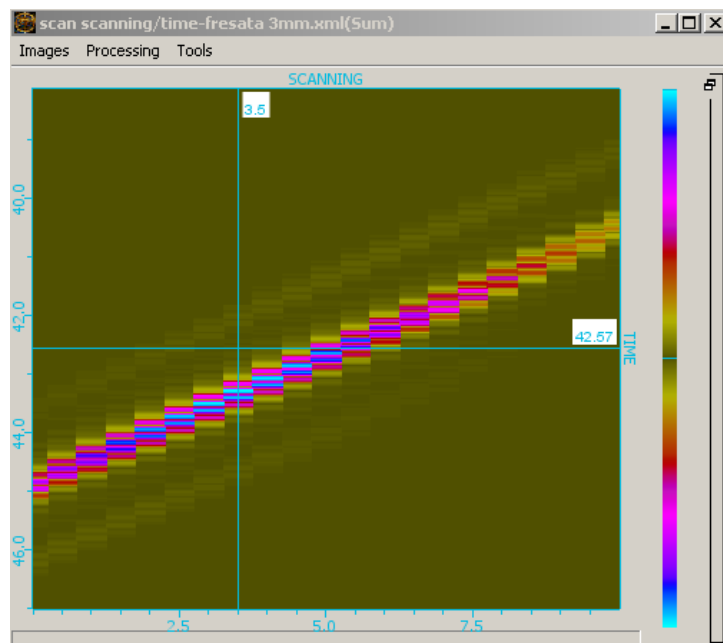


Fig. 5.17 scan scanning fresata 3 mm (al colore azzurro è associata la massima risposta)

Importante far notare che il software non fornisce dei valori di risposta assoluti (in termini di decibel) per questo motivo i confronti per ogni categoria di difetto presente, verranno effettuati in termini di variazione di decibel (delta dB) prendendo come valore di riferimento la risposta del difetto più grande (per le fresate e i concavi quello da 3 mm mentre per i convessi quello da 8 mm).

Di seguito si riportano i dati delle simulazioni effettuate con “on line beam computation” e i grafici di confronto con le acquisizioni sperimentali, dopodiché per avere un’ulteriore conferma dell’efficacia del software si eseguirà il confronto con una precedente simulazione fatta sugli stessi difetti ma con diverse modalità di modellazione (analisi in secondo percorso utilizzando “stored beam computation”).

5.2.1 Risultati Gilardoni RDG 500 e sonda ATM45-4

Si riporta come primo esempio la categoria di difetto tipo fresata. Il risultato della simulazione verrà visualizzato a video in quattro distinte finestre (vedi fig. 5.18) rispettivamente dedicate a: tipo di difetto analizzato, scansione in scala cromatica (scan scanning), A-scan (risposta massima) e relativa posizione della sonda che individua la risposta massima (corner del difetto).

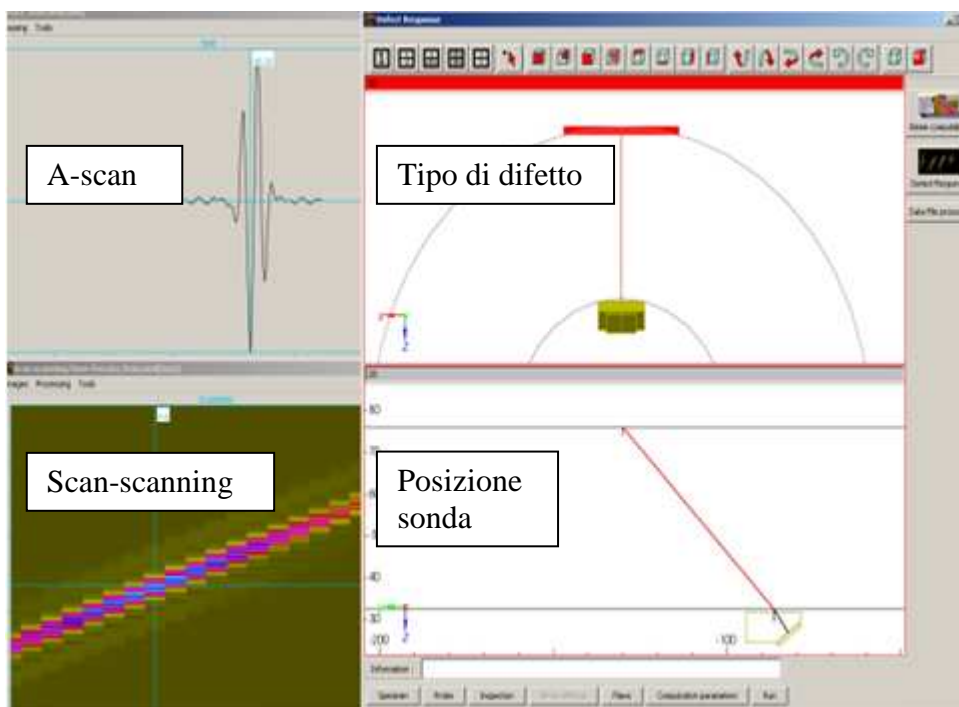
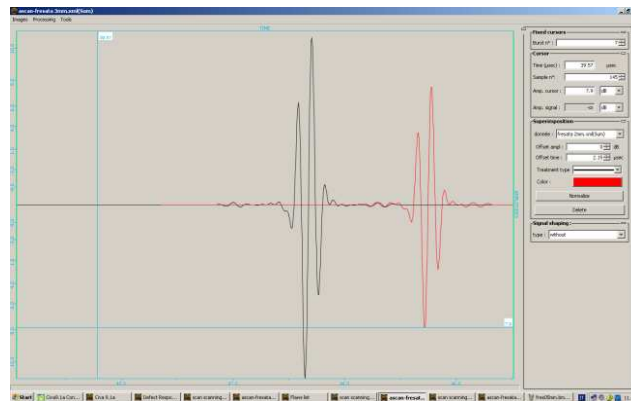


Fig. 5.18 risultato simulazione relativa all’ispezione del difetto fresata 2 mm

Per ottenere le variazioni di decibel si sovrappongono a turno nella finestra relativo all'A-scan del difetto individuato con maggior ritorno di energia (solitamente è quello di dimensioni maggiori) gli A-scan dei restanti difetti appartenenti alla stessa categoria. (fig. 5.19a,b,c)



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.19 delta dB tra le fresate 3 e 2 mm(a), 3 e 1 mm(b), 3 e 0,5 mm (c)

Mediante semplici operazioni di sottrazione si elencano in tabelle (vedi tab. 5.1) le variazioni di decibel (delta dB) ottenute sperimentalmente e con CIVA relativi a ogni categoria di difetto.

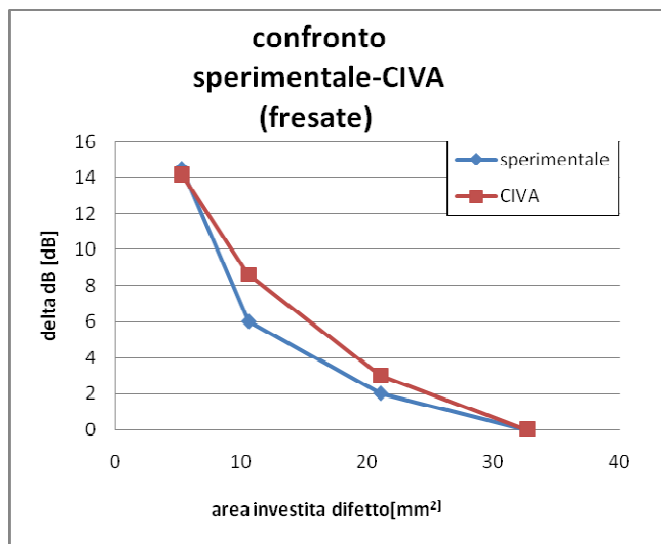
FRESATE	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delta dB [dB] (rispetto al più grande)	delta dB [dB] (rispetto al più grande)
	3	0	0
	2	2	3
	1	6	8,6
	0,5	14,5	14,2

CONCAVI	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delta dB [dB] (rispetto al più grande)	delta dB [dB] (rispetto al più grande)
	3	0	0
	2	3,5	3
	1	9	8,2
	0,5	13,5	13,8

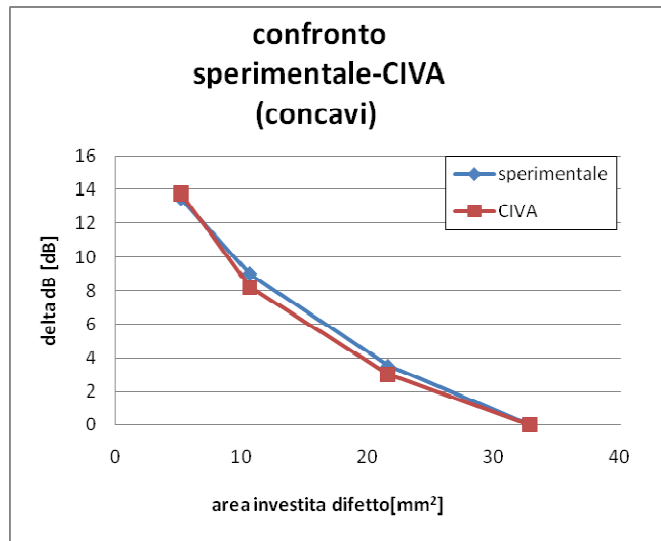
CONVESSI	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delta dB [dB] (rispetto al più grande)	delta dB [dB] (rispetto al più grande)
	8	0	0
	4	0,5	2,5
	2	11,5	11,5
	1	22,5	22,5

Tab. 5.1

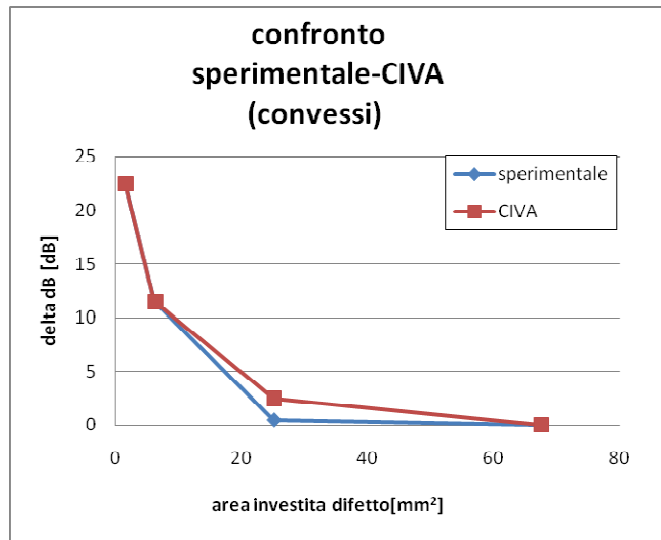
Confrontando le curve dei dati sperimentali con quelle relative alle simulazioni con CIVA viene evidenziata l'efficacia del software infatti le curve sono pressoché sovrapposte per tutte e tre le categorie di difetto (fig. 5.20a,b,c).



(a)



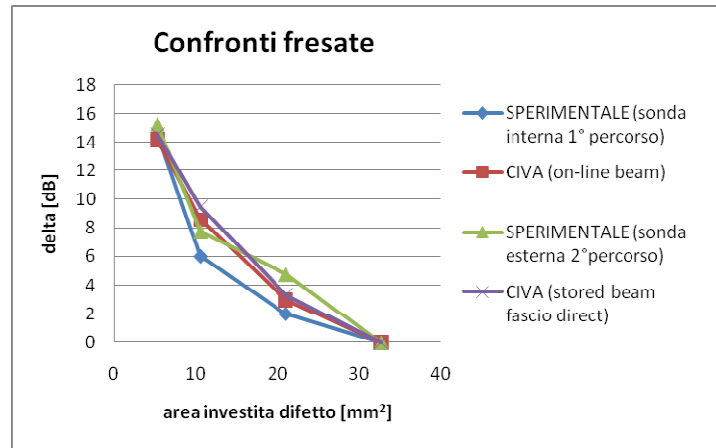
(b)



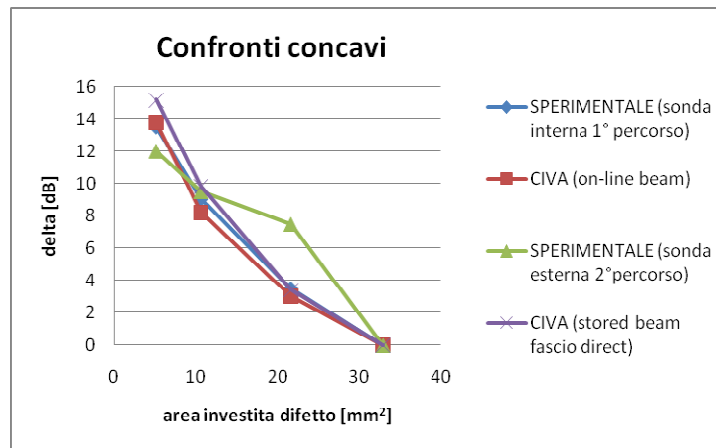
(c)

Fig. 5.20a,b,c confronto sperimentale-CIVA

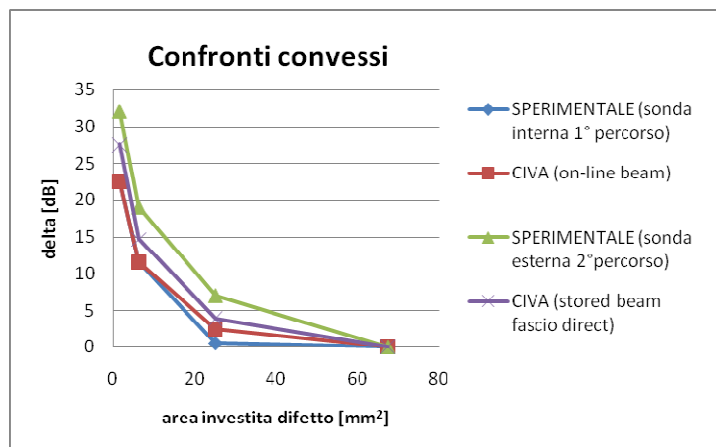
A conferma di questi risultati si riporta un ulteriore confronto con i dati provenienti da una precedente e diversa simulazione degli stessi difetti, come si può ben osservare le curve ottenute sono molto simili tra loro (fig. 5.21a,b,c).



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.21a,b,c confronto sperimentale-CIVA

5.2.2 Risultati Harfang X-32 e sonda phased array

I risultati ottenuti si visualizzano e trattano con le stesse modalità adoperate per la simulazione relativa al rilevatore Gilardoni RDG 500 (fig. 5.24).

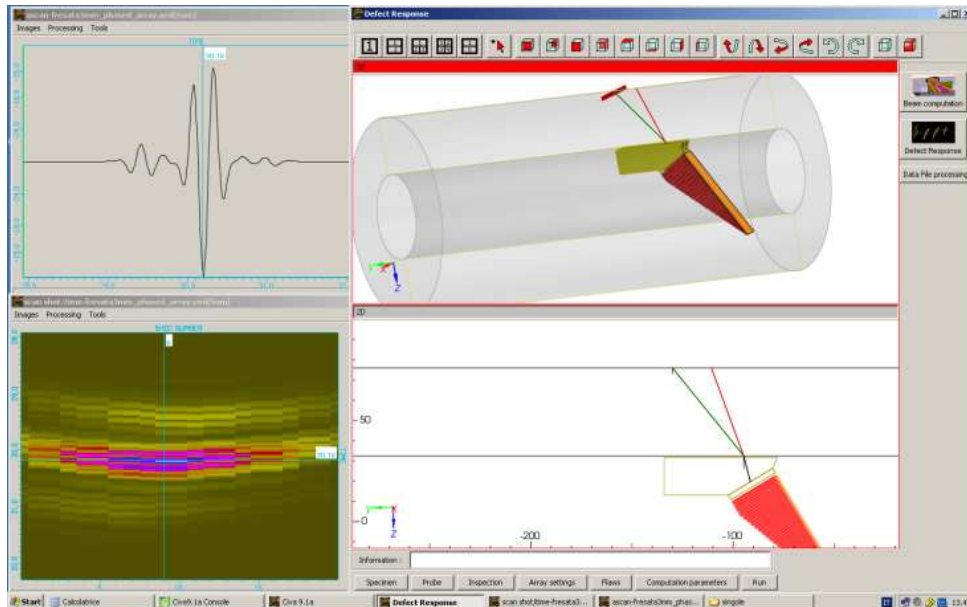


Fig. 5. 24 risultato simulazione relativa all'ispezione del difetto fresata 3 mm.

Disponendo i risultati ordinatamente (vedi tab. 5.2) si osservano delle anomalie riguardo due difetti che sono rispettivamente la fresata e l'intaglio concavo di profondità pari a mezzo millimetro.

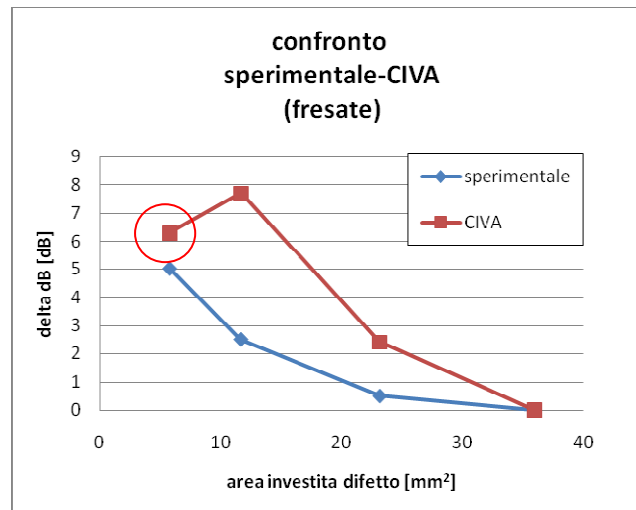
FRESATE	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delt a dB [dB] (rispetto al più grande)	delt a dB [dB] (rispetto al più grande)
	3	0	0
	2	0,5	2,4
	1	2,5	7,7
	0,5	5	6,3

CONCAVI	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delt a dB [dB] (rispetto al più grande)	delt a dB [dB] (rispetto al più grande)
	3	0	0
	2	3,5	2
	1	6	7,6
	0,5	8,5	5,4

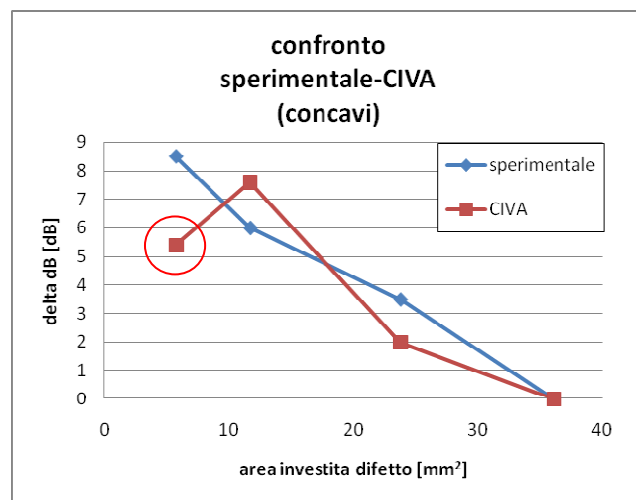
CONVESSI	Dim. caratt. difetto	SPERIMENTALE	CIVA
	[mm]	delta dB [dB] (rispetto al più grande)	delta dB [dB] (rispetto al più grande)
	8	0	0
	4	7	4,6
	2	12,5	14,2
	1	18,5	24,2

Tab. 5.2

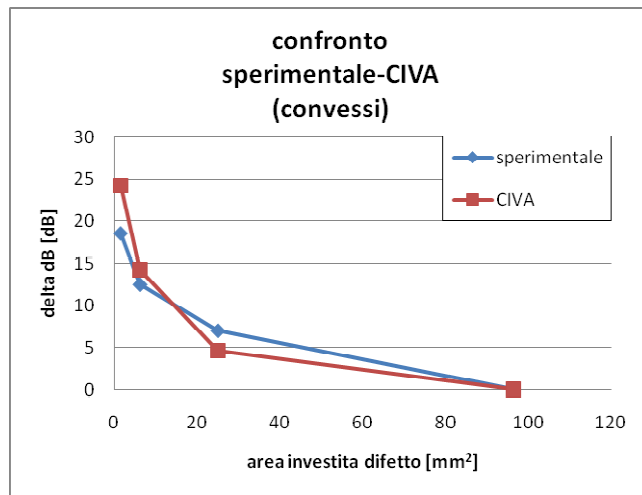
L'andamento dei confronti tra i dati sperimentali e numerici viene mostrato nei grafici sottostanti; come già affermato le curve relative alle fresate e ai concavi hanno un punto che non segue l'andamento crescente atteso (in fig. 5.25a,b sono evidenziati dal cerchio rosso) mentre i convessi da questo punto di vista non danno alcun problema e le curva delle simulazioni segue quella sperimentale (fig. 5.25c).



(a)



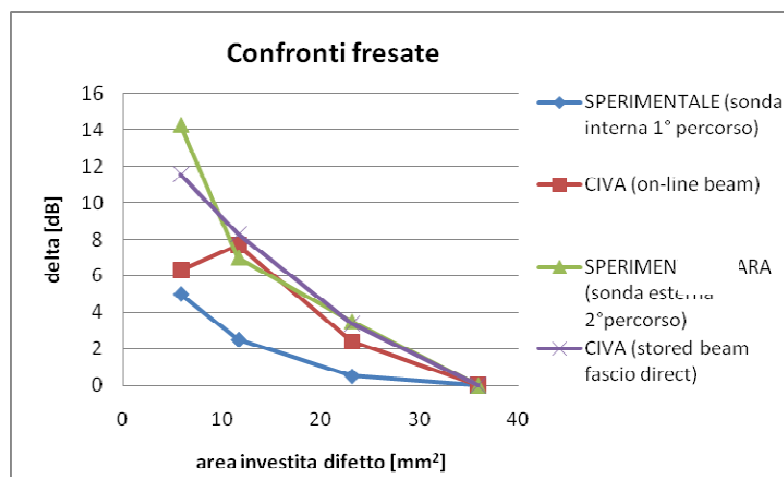
(b)



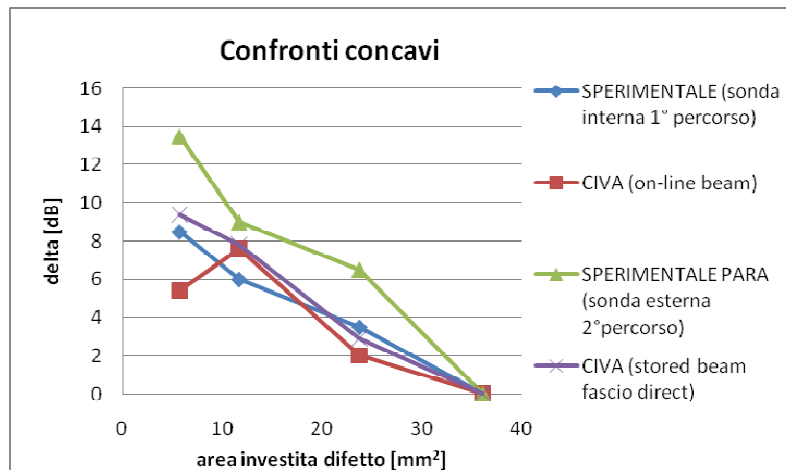
(c)

Fig. 5.25a,b,c confronto sperimentale-CIVA

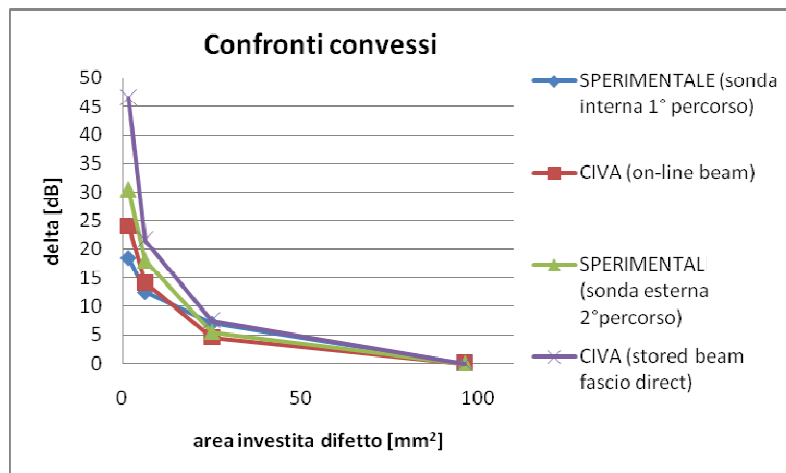
Anche con questa strumentazione, a conferma dei risultati ottenuti con il rilevatore RDG 500, si riporta un ulteriore confronto con i dati provenienti da una precedente e diversa simulazione degli stessi difetti, come si può ben osservare le curve ottenute sono molto simili tra loro (fig. 5.26a,b,c).



(a)



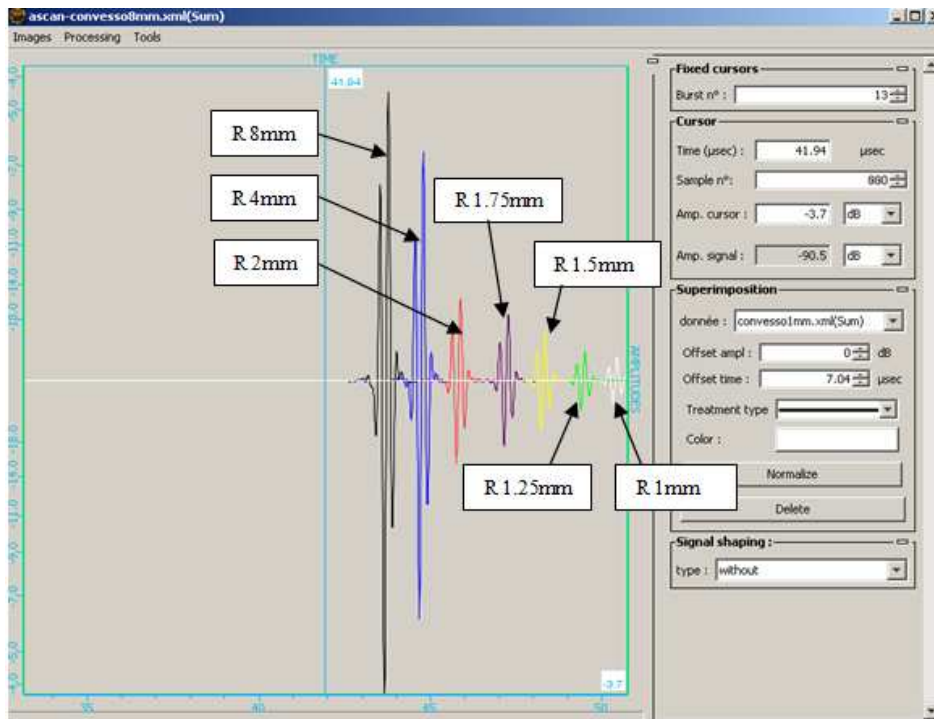
(b)



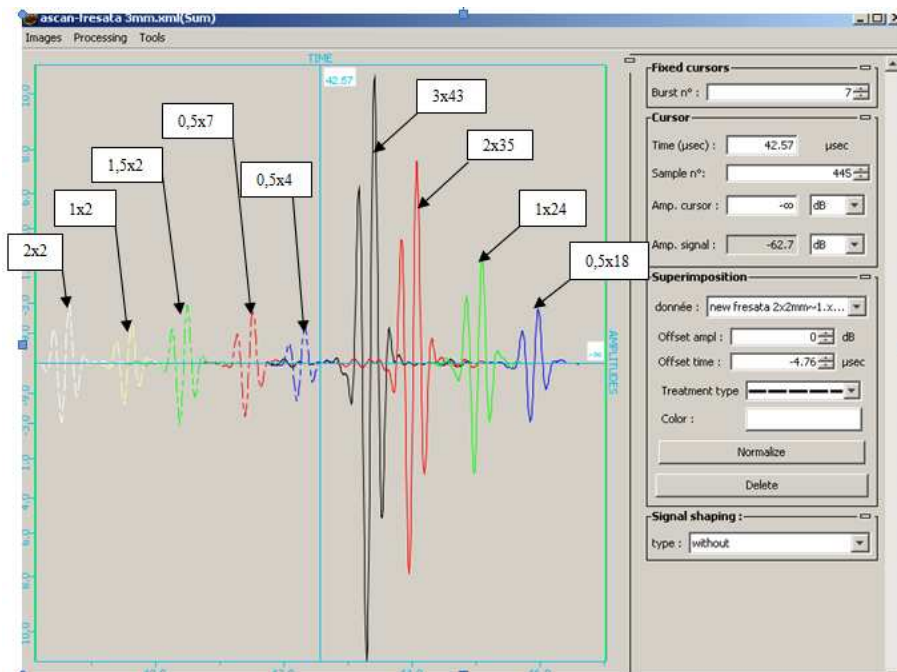
(c)

Fig. 5.26a,b,c confronto sperimentale-CIVA

Dall'osservazione di tutti i confronti tra le risposte sperimentali e simulate si nota una buona efficienza del software, anche se i dati a disposizione sono limitati. Non avendo però a disposizione in un primo momento un ulteriore set di difetti artificiali (nuovi blocchi campione) da cui ricavare le rispettive risposte ultrasonore si può pensare di operare inversamente a quanto si è fatto finora, ovvero ottenere prima le risposte relative alle simulazioni dei nuovi difetti artificiali (fresate e intagli convessi) e successivamente confrontarle con quelle derivanti dal controllo vero e proprio con i rilevatori ultrasonori (in fig. 5.27a,b sono presentati gli A-scan di tutti i difetti divisi per tipo).



(a)



(b)

Fig. 5.27 A-scan delle simulazioni difetti tipo convessi (a), fresate (b)

Con il rilevatore RDG 500 si osserva, per la categoria di difetto fresata, una notevole differenza degli andamenti se plottati in funzione della profondità o dell'area investita dal fascio (fig. 5.28a,b) come si era dimostrato per le prove sperimentali; mentre per i convessi la simulazione numerica segue pressoché fedelmente l'andamento delle prove sperimentali (fig. 5.29).

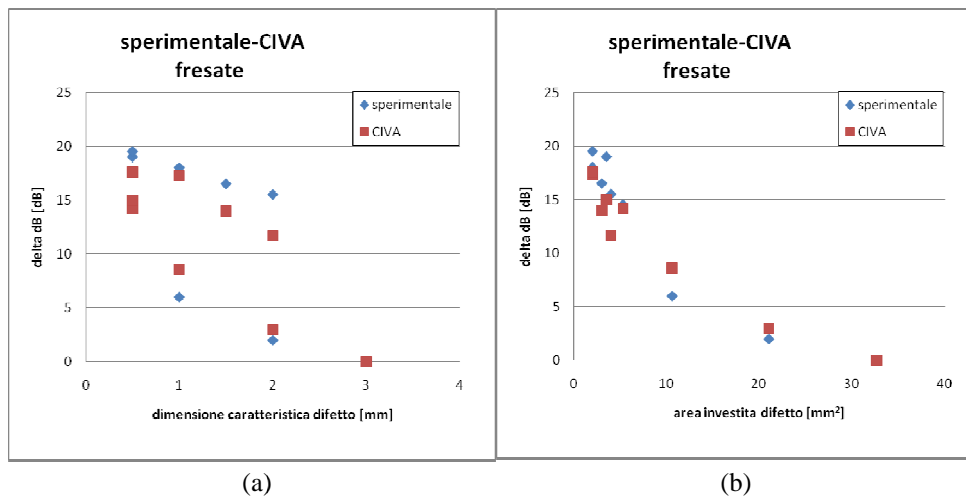


Fig. 5.28 confronto sperimentale-CIVA in funzione della profondità (a) e dell'area investita (b)

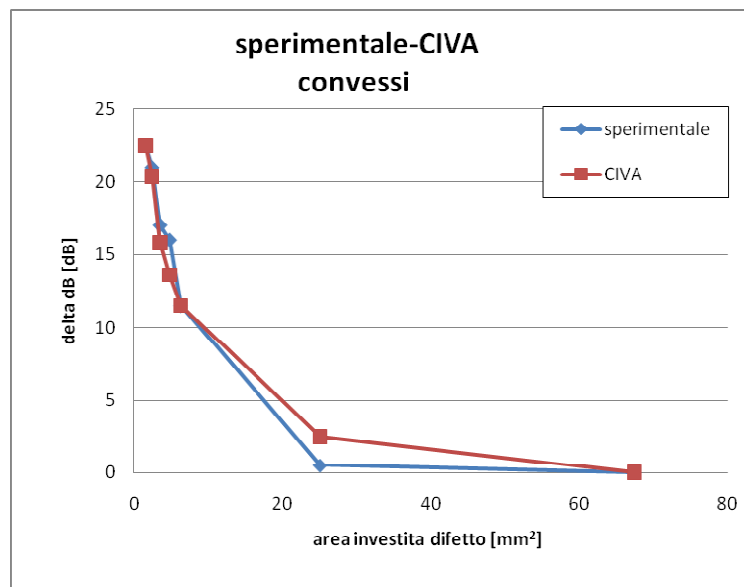
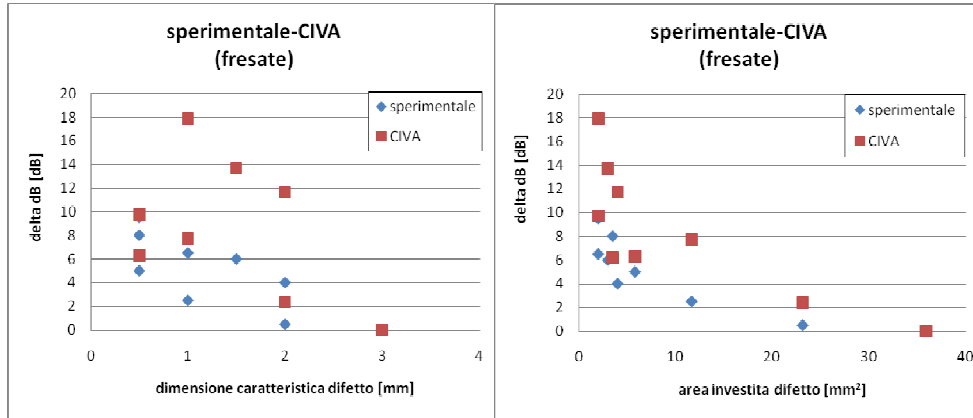


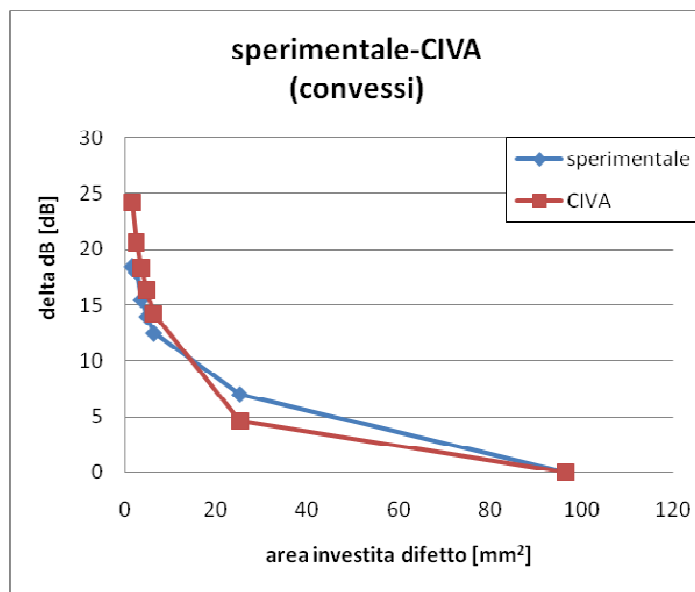
Fig. 5.29 confronto sperimentale-CIVA difetti convessi

Gli stessi risultati, in termini di andamento qualitativo dei confronti, si ottengono con la seconda strumentazione (fig. 5.30a,b,c).



(a)

(b)



(c)

Capitolo 6

Conclusioni

Le risposte ultrasonore provenienti da difetti artificiali di geometria molto diversa e cricche naturali da fatica tipicamente riscontrate e qui appositamente ottenute, su assili ferroviari sono state confrontate ottenendo le seguenti conclusioni: innanzitutto la pratica di diagrammare i risultati in termini di una dimensione lineare caratteristica del difetto (profondità o raggio) (fig. 6.1) si è dimostrata meno efficace rispetto al considerare l'area del difetto stesso effettivamente investita dal fascio ultrasonoro in modo tale da rendere le risposte sperimentali indipendenti dalla forma del difetto infatti le risposte in termini di area investita si dispongono secondo una retta nel diagramma semi-logaritmico, questo succede sia qualora il controllo venga effettuato in modalità secondo percorso (in riflessione) (fig. 6.2) sia in primo percorso (diretto) (fig. 6.3).

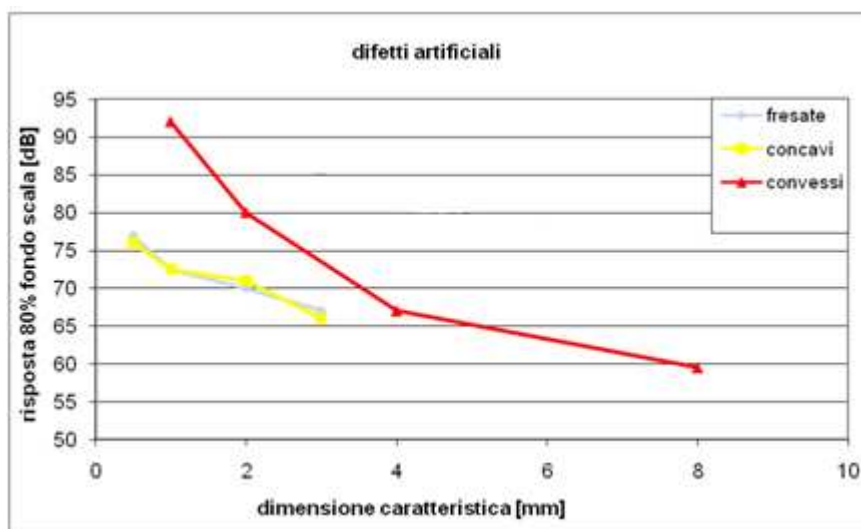


Fig. 6.1 Risposta UT in funzione della dimensione caratteristica, (analisi in 2° percorso Gilardoni RDG 500)

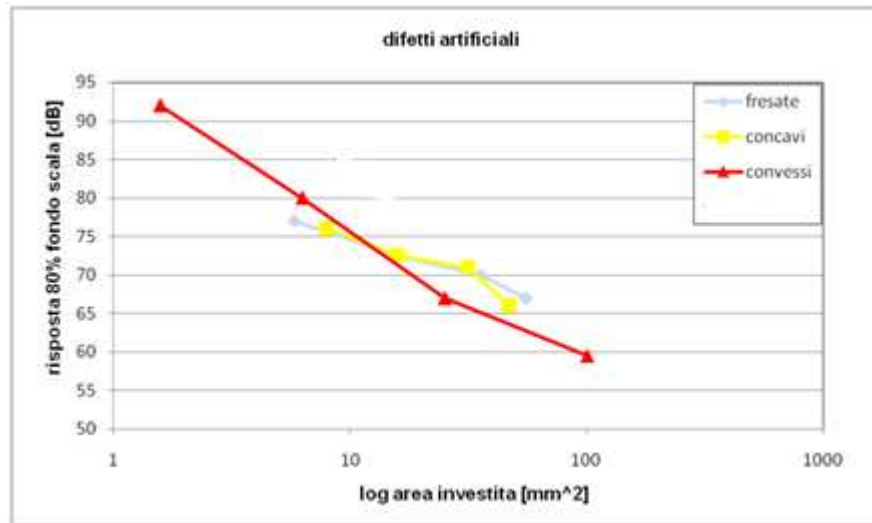


Fig. 6.2 Risposta UT in funzione dell'area investita (in scala semilogaritmica), (analisi in 2° percorso Gilardoni RDG 500)

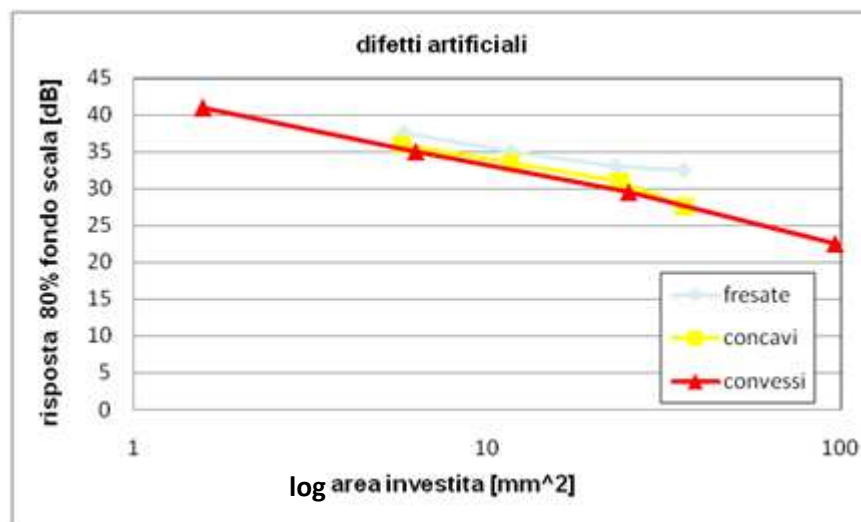


Fig. 6.3 Risposta UT in funzione dell'area investita (in scala semilogaritmica), (analisi in 1° percorso Harfang X-32)

Per quanto riguarda i difetti da fatica, ottenuti durante le prove di propagazione full-scale su assili ferroviari, e riguardanti le posizioni tipiche dei cedimenti in esercizio (corpo, transizione, portata) in ogni caso sono i più difficili da rilevare e da misurare soprattutto a causa della loro possibile parziale chiusura; si è rivelata importante al riguardo, la possibilità di operare con albero sotto carico e con difetto disposto in una condizione di apertura; da un primo confronto con i

difetti artificiali le risposte di cricche naturali di fatica interessanti la zona del corpo assile (a poca distanza dalla sezione maggiormente sollecitata che si trova appunto nella zona di raccordo tra il corpo e la portata) a forma tipicamente convessa (semiellittica) (fig. 6.4) si adagiano efficacemente sulla curva effettiva diagrammata in termini di area investita (fig. 6.5). I confronti successivi confermano questa tendenza anche per le risposte relative alle cricche di dimensioni minori e riguardanti non più il corpo ma la transizione (fig. 6.6).



Fig. 6.4 alcuni assili sezionati

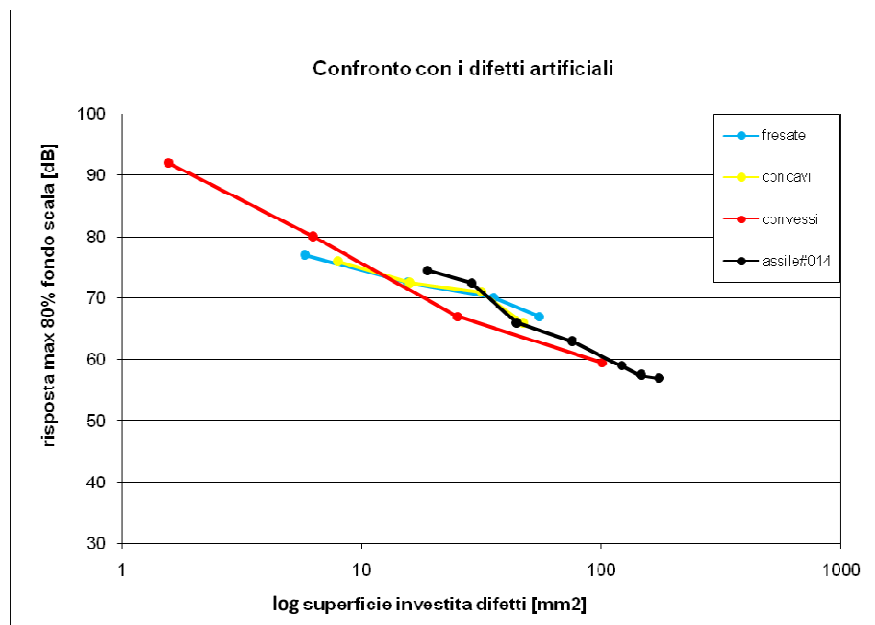


Fig. 6.5 confronto risposte UT di difetti artificiali e cricca naturale di fatica (sul corpo assile) in funzione dell'area investita dal fascio (in scala semilogaritmica)

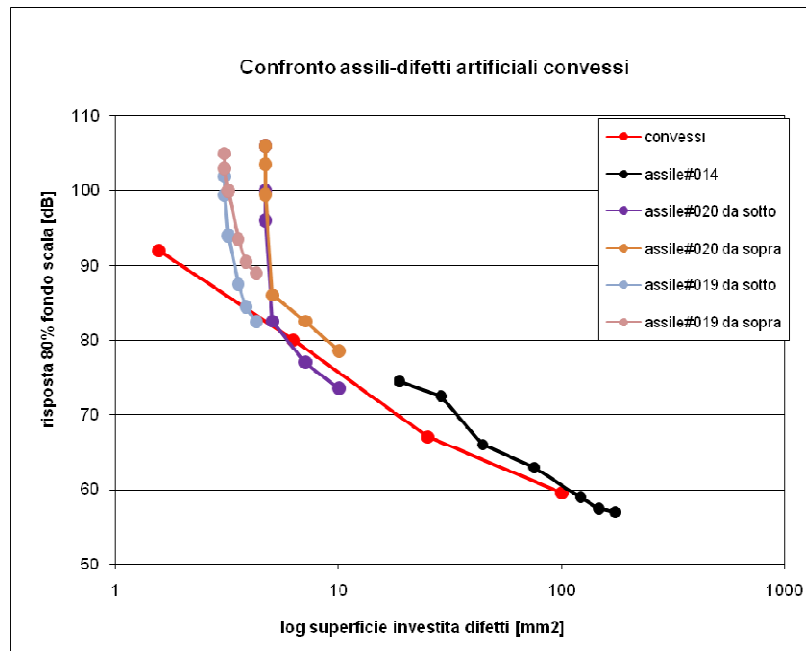


Fig. 6.6 confronto risposte UT di difetti artificiali convessi, cricca naturale di fatica (sul corpo) e cricche naturali di fatica (sulla transizione) in funzione dell'area investita dal fascio (in scala semilogaritmica)

Dal punto di vista metodologico-sperimentale, utilizzare una centralina tradizionale (Gilardoni RDG 500) con sonda monocristallo od un sistema di nuova generazione phased array (Harfang X-32) produce gli stessi risultati (fig. 6.7), nonostante il secondo sistema permette analisi e facilitazioni all'operatore impensabili per il primo; il controllo con tecniche manuali risulta ancora però estremamente dipendente dall'operatore che lo esegue per questo motivo su scala industriale viene sostituito da impianti automatici (borosonda) che garantiscono migliori performance ed un' elevata affidabilità.

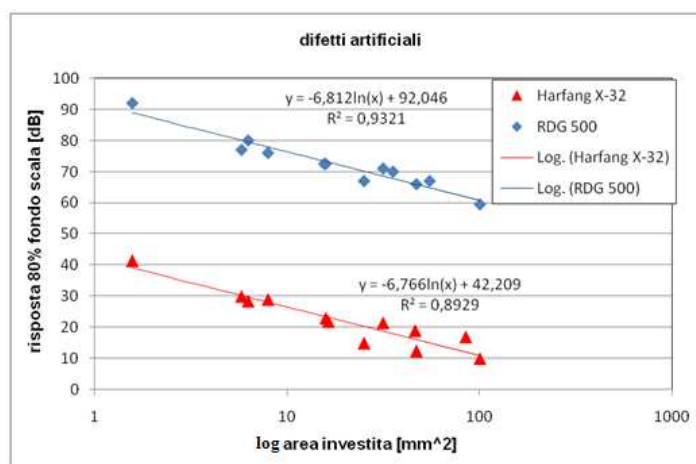


Fig. 6.7 confronto risposte UT in funzione dell'area investita in scala logaritmica

In relazione alle tecniche di dimensionamento dei difetti una su tutte sembra avere particolare efficacia per la stima della profondità, ed è quella che sfrutta il fenomeno della diffrazione prodotto dalle discontinuità in quanto gli echi diffratti, facilmente rilevabili per mezzo di un esame tipo sectorial scanning (fig. 6.8), sono riferimenti importanti per calcolare l'altezza delle discontinuità. I risultati più soddisfacenti si hanno comunque nelle stime delle profondità dei difetti artificiali mentre le cricche naturali di fatica sono difficilmente caratterizzabili soprattutto se sono di piccole dimensioni (sovrapposizione degli echi) come per gli assili 019 e 020 per i quali non è stato possibile stimare la profondità con il metodo ultrasonoro mentre per l'assile 014 la stima è affetta da un notevole errore (fig. 6.9).

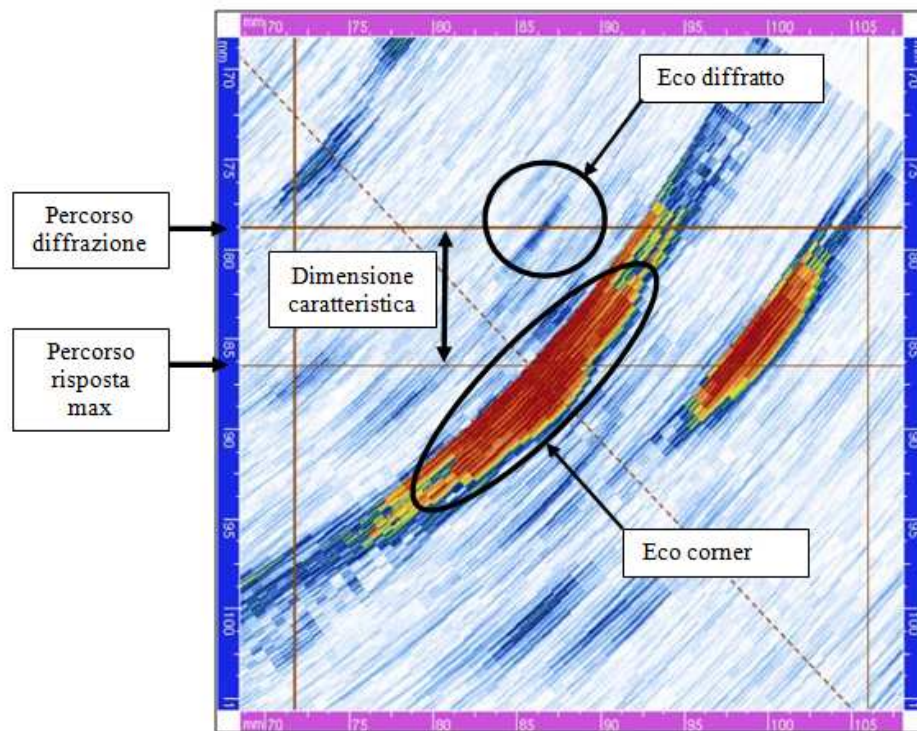


Fig. 6.8. S-scan del difetto convesso 8 mm

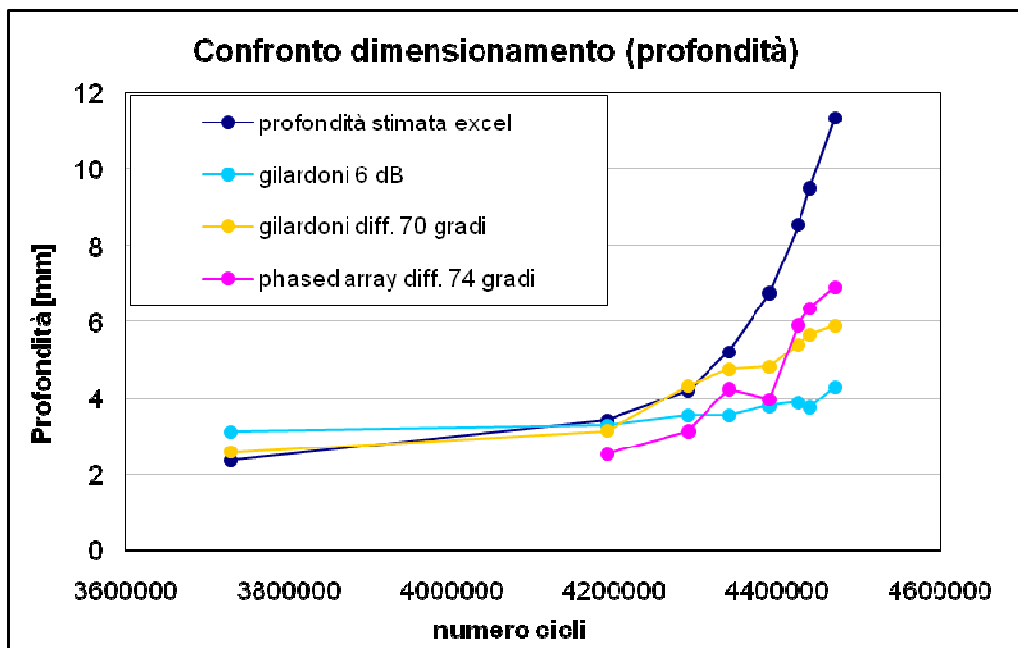


Fig. 6.9 confronto metodi dimensionamento profondità cricca assile 14

L' esperienze riportata nella presente trattazione denominata "analisi cricche naturali di fatica-fretting" evidenzia l'importanza di una procedura coordinata nella applicazione dei metodi non distruttivi dedicati al controllo degli assili ferroviari che veniva effettuato in un primo momento con i liquidi magnetici fluorescenti per aver un riscontro visivo (fig. 6.10), dopodiché si procedeva con il controllo a ultrasuoni.

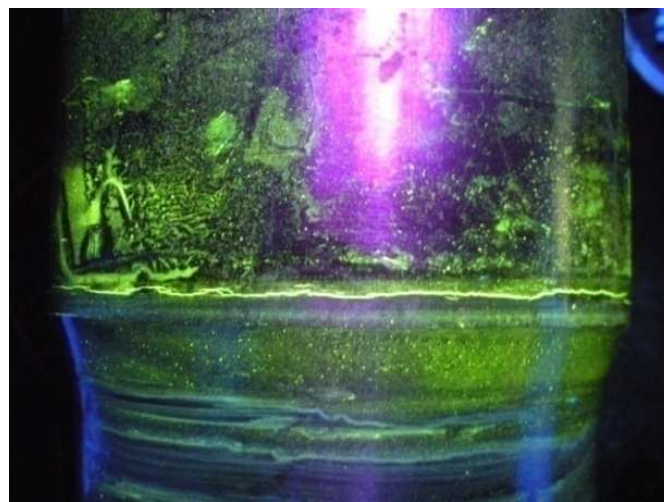


Fig. 6.10 cricca sulla portata individuata con liquidi magnetici fluorescenti

Le analisi numeriche della risposta UT di difetti, eseguite con il software dedicato CIVA, hanno mostrato un'ottima corrispondenza con le evidenze sperimentali e hanno quindi permesso di infoltire il campione dei difetti analizzati operando inversamente (6.11), ovvero ottenendo le risposte UT dalle simulazioni ancor prima di effettuare il controllo vero e proprio con i rilevatori. Dal successivo confronto con i dati sperimentali si ha un'ulteriore conferma dell'efficacia del software (fig. 6.12).

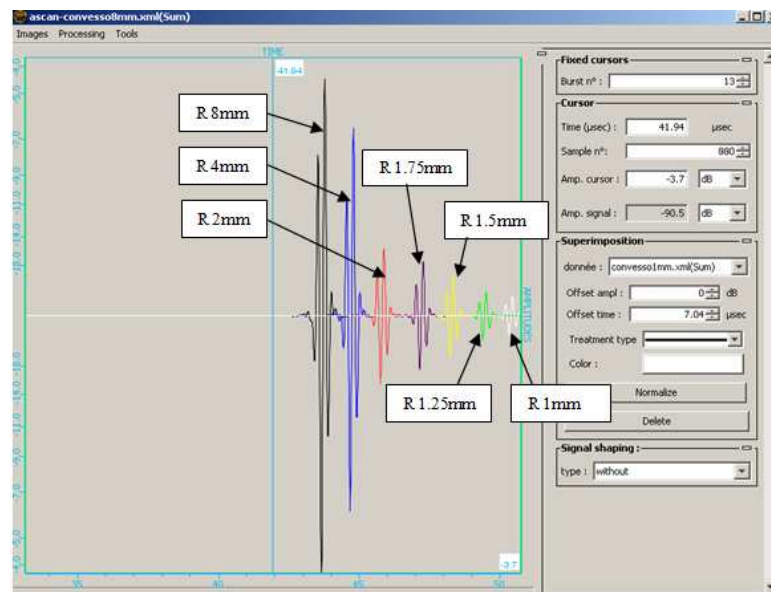


Fig. 6.11 A-scan delle simulazioni difetti tipo convessi

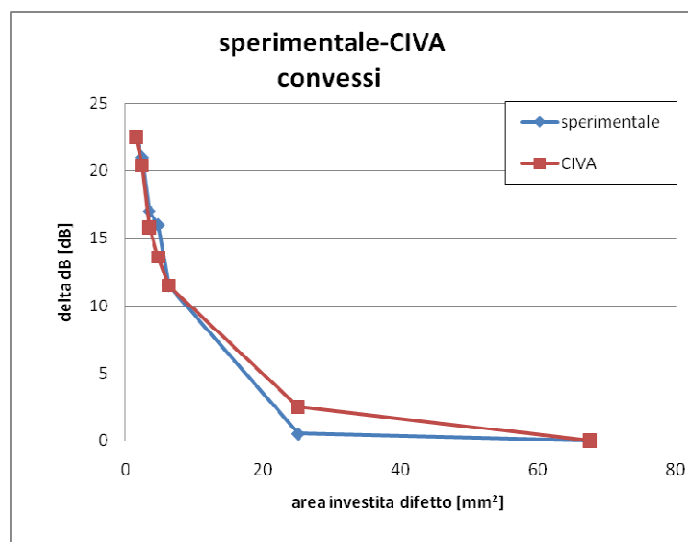


Fig. 6.12 confronto sperimentale-CIVA difetti convessi

Bibliografia:

- [1] A technical document issued by the International atomic Energy agency, Ultrasonic testing of materials at level 2, Vienna, 1988.
- [2] ASM handbook vol. 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control.
- [3] A. F. Grandt, Fundamentals of structural integrity: damage tolerant design and nondestructive testing, Wiley, 2003.
- [4] D. Colombo, M. Giglio, C. Giani, U. Mariani, Progettazione damage tolerance di una fusoliera di elicottero, Atti del Congresso IGF19 Milano, 2-4 luglio 2007.
- [5] D. Broek, Elementary engineering fracture mechanics, Martinus Nijhoff publishers, Boston, 1982.
- [6] S. Cantini, G. Patelli, S. Beretta, M. Carboni, Lucchini Sidermeccanica S.p.A. Dipartimento per la Qualità, Politecnico di Milano Dipartimento di Meccanica, Intervalli di ispezione di assili ferroviari in acciaio ad alta resistenza: influenza della curva POD.
- [7] M. Carboni, F. Reboa, M. Sangirardi, Il controllo non distruttivo di alberi rotanti, Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 2008.
- [8] G.A. Georgiou, Probability of Detection (POD) curves: derivation, applications and limitations, Research Report 454, HSE Books, Health and Safety, Executive, UK, 2006.
- [9] AIM, Le prove non distruttive, 1999.
- [10] UNI EN 1289, Controllo non distruttivo delle saldature – Controllo delle saldature mediante liquidi penetranti – Livelli di accettabilità, 2006.
- [11] M. Carboni, An Analysis of UT Echoes Coming from Fatigue Cracks and Artificial Defects on Railway Axles, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [12] Gilardoni S.p.a., Modo d'Uso Rilevatore Ultrasonoro Digitale Universale Gilardoni RDG 500.
- [13] Harfang Microtechniques Inc., X-32 User's manual (Version 2.33R), Quebec City, QC, 2006.
- [14] Krautkramer J., Krautkramer H., Ultrasonic Testing of Materials, 4th Edition, Springer-Verlag, 1990.
- [15] Harfang Microtechniques Inc., User's Probe Booklet, DAAH for Ultrasound NDT.
- [16] M. Carboni, M. De Mori, Dipartimento di Meccanica, Sistema Qualità, Politecnico di Milano, Uso e Gestione del Banco Dinamico Assili.

[17] S.Cervello, D.Ongaro, Metodo innovativo per la determinazione della resistenza a fatica nelle portate di calettamento di assili ferroviari, Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) XXXV Convegno Nazionale – 13-16 Settembre 2006, Università Politecnica delle Marche.

[18] CEA/CEDRAT, CIVA 9.1a User's Manual, 2009.