

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Rivelazione di difetti interni a componenti metallici utilizzando sistemi di laser ultrasonics

Detection of internal defects in metallic components by laser ultrasonics systems

Relatore:
Prof. Gian Marco Revel

Tesi di Laurea di:
Andrea Montesi

Correlatore:
Ing. Giuseppe Pandarese

Anno Accademico 2022/2023

Indice

Introduzione **4**

1. Campo di applicazione **6**

1.1. Difetti nei binari ferroviari 6

2. Introduzione alle onde **8**

2.1. Grandezze fisiche 10

2.2. Generazione delle onde 13

2.2.1. Tecnologia Laser Ultrasonics 13

2.3. Interazione dell'onda all'interfaccia (riflessione e rifrazione) 14

2.4. Ricezione delle onde ultrasonore 16

3. Set-up sperimentale **17**

3.1. Laser Continuum NY60-10 17

3.2. Sonda CMUT 18

3.3. Robot cartesiano Hirata 18

4. Difetti analizzati **19**

5. Prove effettuate **21**

5.1 Set-up 1 21

5.1.1. Studio dei tempi di volo 22

5.1.2 Risultati Set-up 1 24

5.2. Set-up 2 29

5.2.1. Risultati Set-up 2 30

5.3. Set-up 3 35

5.3.2. Risultati Set-up 3.1 36

5.3.4. Risultati Set-up 3.2 38

Conclusioni **41**

Introduzione

Al fine di garantire il corretto funzionamento di impianti e macchinari risulta sempre fondamentale una accurata manutenzione degli stessi, che passa ovviamente per l'ispezione di tutti i componenti soggetti ad usura e a fatica, ovvero quelli che più probabilmente svilupperanno cricche e difetti, compromettendo la sicurezza di un eventuale utilizzatore.

Le tecnologie che permettono il controllo e il monitoraggio di queste problematiche sono diverse e specifiche al campo di applicazione, in generale però possiamo dividerle in due macrocategorie: i controlli distruttivi e i controlli non distruttivi. I primi sono principalmente utilizzati in laboratorio e durante la sperimentazione di nuovi componenti al fine di stabilirne la conformità delle proprietà meccaniche all'impiego che dovrà essere svolto, comportandone spesso la rottura o la perdita di integrità strutturale. I secondi, invece, sono largamente utilizzati in sede di diagnostica e revisione di componenti meccanici che prevedono dei controlli periodici, al fine di garantirne l'efficiente e sicuro funzionamento. In questo caso l'analisi di eventuali difetti va effettuata senza compromettere l'integrità del componente, il quale se giudicato ancora idoneo dovrà riprendere la propria funzione.

Proprio tra i controlli non distruttivi si inserisce la tecnologia Laser Ultrasonic la quale sfrutta un impulso laser ad alta potenza per generare delle onde ultrasonore all'interno del componente analizzato ed utilizza una sonda specifica per captare queste onde. Eventuali variazioni nel segnale ricevuto sono indice di difformità nel componente. Sfruttare le onde che si propagano all'interno del campione permette di individuare anche difetti non visibili dall'esterno, offrendo un enorme potenzialità all'utilizzatore. A differenza delle tecniche ad ultrasuoni tradizionali, in cui la generazione delle onde è affidata ad un trasduttore appoggiato al componente in esame, la tecnologia Laser Ultrasonic è completamente senza contatto, portando grandi benefici in termini di usura, sia del pezzo ma anche della strumentazione stessa con cui viene effettuata l'analisi.

In questa tesi verrà analizzata la capacità di questa tecnologia di individuare eventuali difetti in componenti metallici, i quali, grazie alla loro bassissima impedenza acustica, offrono un mezzo perfetto alla propagazione delle onde ultrasonore, consentendo così di effettuare un'analisi efficace del campione.

1. Campo di applicazione

Nello specifico i campioni analizzati sono stati spezzoni di binari ferroviari, nei quali, al fine dello studio in laboratorio, sono stati creati appositamente dei difetti campione, esemplificativi di eventuali difettosità vere e proprie.

1.1. Difetti nei binari ferroviari

Il controllo dei difetti nei binari ferroviari riveste un ruolo di fondamentale importanza per il corretto funzionamento della linea e soprattutto per la sicurezza di chi ne fa uso. I difetti che possono manifestarsi nei binari costituiscono infatti una delle principali cause di incidenti e deragliamento dei convogli. Le cause che portano alla formazione di difetti possono essere molteplici e talvolta complesse, ma le possiamo dividere in tre principali categorie:

- difetti dovuti ad errori di fabbricazione;
- difetti dovuti ad errori di manipolazione, installazione ed un uso inadeguato;
- difetti dovuti all'usura e alla fatica.

- **Difetti di fabbricazione**

I difetti di fabbricazione sono dovuti ad errori durante i processi di fonderia, in particolare potrebbero venire a formarsi durante le fasi di raffreddamento del profilato delle inclusioni gassose all' interno del metallo, le quali in seguito al raffreddamento della rotaia ed al relativo ritiro dell'acciaio si troveranno sotto pressione, provocando delle tensioni all'interno del metallo. Durante le fasi di esercizio le sollecitazioni dovute al passaggio dei treni andranno a sommarsi a quelle già presenti dovute alle inclusioni gassose comportando uno stress complessivo di molto maggiore a quello di progetto, compromettendo la strutturalità della rotaia e determinando la formazione di cricche e il cedimento della stessa. In modo simile agiscono i difetti dovuti alla non omogenea mescolanza dei vari elementi costitutivi della lega dell'acciaio, dette segregazioni, nei pressi delle quali durante l'esercizio si vengono a creare delle concentrazioni anomale di tensioni nel metallo provocando rotture e cricche premature.

- **Difetti di manipolazione, installazione ed un uso inadeguato**

I difetti dovuti alla manipolazione, installazione ed utilizzo inadeguato della rotaia possono essere diversi, tra questi ci sono: lo slittamento delle ruote sulle rotaie, l'interazione con agenti corrosivi presenti nell'asfalto in coincidenza dei passaggi a livello, il posizionamento non perfetto della rotaia sulla massicciata e l'impreciso allineamento degli scambi, la velocità eccessiva dei treni sulla linea e in particolare sulle curve. Sono tutte condizioni che provocano un utilizzo più gravoso del normale per le rotaie e che possono portare allo sviluppo prematuro di difetti.

- **Difetti d'usura e vita a fatica**

I difetti dovuti alla fatica e all'usura della rotaia si manifestano in seguito ad un periodo di esercizio sufficientemente lungo e si possono dividere in tre gruppi principali:

corrugazione;

danni a fatica per contatto volvente;

crepe nei fori dei bulloni.

I primi sono dovuti ad un'usura non uniforme della superficie di rotolamento della rotaia, andando a compromettere l'efficienza e la rumorosità del rotolamento della ruota. I secondi sono i più diffusi e pericolosi tra i difetti dovuti all'esercizio, provocando la formazione di cricche interne al binario con conseguente perdita di integrità strutturale. Gli ultimi si manifestano in corrispondenza delle giunzioni appunto bullonate di due spezzoni di rotaia, in corrispondenza dei fori si vengono a creare delle crepe dovute allo sfregamento dei bulloni con le pareti dei fori al passaggio dei convogli.

2. Introduzione alle onde

Le onde meccaniche si basano sull'oscillazione degli elementi o delle particelle costituenti il mezzo in cui si propagano, a seconda del tipo di oscillazione è possibile suddividerle in tre categorie:

- onde longitudinali: in cui l'oscillazione avviene lungo la direzione di propagazione;
- onde trasversali in cui l'oscillazione avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione
- onde superficiali, le quali sono una combinazione delle precedenti e come suggerisce il nome si propagano solamente sulla superfice del mezzo.

Le onde sonore sono onde meccaniche e dipendono quindi dall'oscillazione elastica delle particelle costituenti la materia attorno al loro punto di equilibrio. Nel caso particolare degli ultrasuoni queste oscillazioni avvengono con frequenze superiori ai 20 kHz e quindi al di sopra dell'udibile dall'orecchio umano.

Per rappresentare in maniera più chiara possibile il fenomeno fisico che sta alla base della propagazione delle onde all'interno di un mezzo solido è utile fare ricorso ad un modello semplificato della materia, dove quest'ultima viene rappresentata come un reticolo di masse puntiformi (particelle) collegate le une alle altre tramite delle molle.

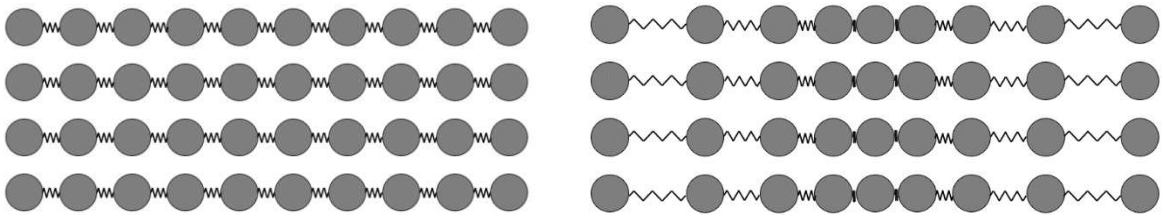


Figura 1. Propagazione delle onde, modello a molle

Questo fa sì che ogni singola particella sia libera di oscillare intorno alla sua posizione di equilibrio, ma ciò comporta un'alterazione anche per le particelle vicine alle quali verrà trasferita parte dell'energia dell'oscillazione iniziale. Conseguentemente, imprimendo una sollecitazione ad un intorno di particelle, queste trasferiranno il loro moto alle particelle vicine, che a loro volta lo passeranno a quelle a loro successive creando una reazione a catena che determinerà la propagazione dell'onda all'interno del mezzo materiale.

La propagazione dell'onda avrà diverse caratteristiche a seconda delle proprietà del mezzo materiale, che nel modello sopra descritto corrisponderebbero ad una diversa costante elastica delle molle e ad un loro diverso posizionamento. Ad esempio, nella rappresentazione di un mezzo molto rigido occorre fare uso di molle con costante elastica elevata (viceversa per materiali più morbidi). Questo ci permette di comprendere intuitivamente come un solido sia capace di offrire resistenza sia a forze di taglio che di compressione, permettendo la propagazione di onde trasversali e longitudinali.

Diverso è il caso per i mezzi materiali fluidi come liquidi e gas, per i quali il modello semplificativo sopra descritto non può essere applicato, questo è dovuto alla diversa interazione intermolecolare che presentano; i legami, infatti, non sono più fissi e stabili ma dinamici e molto più deboli, e offrono una resistenza alle forze di taglio pressoché nulla. Si ha quindi che le sollecitazioni che i fluidi sono in grado di trasmettere sono solamente quelle di tipo longitudinale che si traducono in un gradiente di pressione (pressione sonora).

2.1. Grandezze fisiche

Al fine di caratterizzare al meglio il comportamento delle onde sonore si ricorre all'utilizzo di specifiche grandezze fisiche volte a descriverne le caratteristiche.

Abbiamo quindi:

Pressione (p: valore istantaneo; P: valore max);

Frequenza (f);

Velocità dell'onda (v);

Lunghezza d'onda (λ);

Impedenza acustica (Z);

Intensità (J);

Decibel (dB).

Pressione

Al passaggio di un'onda si verifica un'alterazione dello stato fisico del mezzo materiale, nel caso di onde longitudinali abbiamo una variazione di pressione. Se tracciamo il grafico nel tempo dell'andamento della pressione a cui sono sottoposte le singole particelle otteniamo l'andamento in figura:

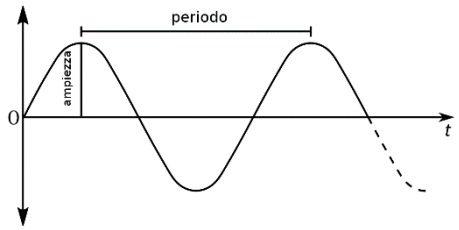


Figura 2. Pressione sonora

Frequenza

Considerato un punto fisso nello spazio e presa in esame la sia pressione sonora, possiamo definire come periodo (T) il tempo, espresso in secondi, che intercorre tra due massimi della pressione registrata nel punto, è quindi il tempo necessario a compiere in ciclo completo. La

frequenza (f) è il reciproco del periodo, ovvero il numero di cicli che vengono computi per unità di tempo.

$$f=\frac{1}{T} \quad (1)$$

L'unità di misura della frequenza è l'Hz ($\frac{1}{s}$).

Velocità e lunghezza d'onda

La distanza che intercorre tra due massimi della funzione prende il nome di lunghezza d'onda, viene indicata con la lettera greca lambda (ʎ), l'unità di misura è il metro (m), la velocità è data dalla lunghezza d'onda sul periodo

$$v = \frac{ʎ}{T}\ (^{m}/_{s}) \quad (2)$$

Impedenza acustica

L'impedenza acustica è il parametro che descrive la resistenza all'avanzamento dell'onda all'interno di un mezzo. Questo accade poiché la propagazione dell'onda è un fenomeno di deformazione in campo elastico del materiale e, ad eccezione di un'analisi ideale, quest'ultimo offre una certa resistenza alla deformazione. L' impedenza acustica specifica è caratteristica del singolo mezzo materiale e viene definita come:

$$Z= \rho\ v \quad (3)$$

Intensità

L'intensità sonora (J) è definita come la quantità di energia che transita per unità di area, ed è definita come:

$$J=\frac{P^2}{2Z} \quad (4)$$

Dove P è la pressione sonora e Z l'impedenza acustica.

Decibel

Nello studio di alcuni fenomeni si rende talvolta necessario esprimere le varie grandezze fisiche come differenza di un valore base, e se le differenze sono abbastanza grandi si ricorre

all'utilizzo di una scala logaritmica che permette di avere numeri piuttosto piccoli per esprimere invece diversità molto grandi. Nello specifico abbiamo:

$$20log_{10}(\frac{A}{B}) \quad (5)$$

Dove A e B nel caso dell'acustica sono due ampiezze e ci esprime di quanti Db A sia maggiore o minore di B.

2.2. Generazione delle onde

La generazione delle onde ultrasonore può avvenire tramite trasduttori o tramite laser, i primi sfruttano degli impulsi elettrici applicati ad un elemento oscillante o un cristallo piezoelettrico, il secondo invece trasferisce la sua energia al campione e prende il nome di laser ultrasonics.

2.2.1. Tecnologia Laser Ultrasonics

La generazione delle onde si basa quindi sull'interazione tra impulso laser e superficie del campione metallico, a seconda della potenza dell'impulso si vengono a creare due diverse modalità di generazione: regime termoelastico; regime ablativo.

Nel primo caso la generazione delle onde ultrasonore è affidata al gradiente termico che si verifica all'interfaccia in seguito all'arrivo dell'impulso laser; infatti, una parte dell'energia viene riflessa dalla superficie del campione subendo così fenomeni di scattering, l'altra invece viene assorbita dal campione e convertita in calore. Le ridotte dimensioni dello spot laser (5-10 mm), rispetto alle dimensioni del campione, e la brevissima durata dell' impulso (nell'ordine dei nanosecondi) fanno sì che il gradiente di temperatura generato si trovi solamente nell'estrema prossimità della superficie colpita dal fascio di luce, questo comporta la generazione di stress termici locali nel metallo responsabili dell'effettiva generazione delle onde.

Per quanto riguarda invece il regime ablativo, quest'ultimo si verifica nei casi in cui la potenza del laser è sufficientemente elevata da portare a fenomeni di vaporizzazione o alla generazione di plasma. Dai casi sperimentali è chiaro come il regime ablativo porti ad un incremento di ampiezza delle onde longitudinali; infatti, secondo alcuni modelli presentati per descrivere il fenomeno l'onda generata è del tutto assimilabile alla composizione di due onde distinte, una dovuta a fenomeni termoelastici e ad una forza che agisce perpendicolarmente alla superfice dovuta al momento della parte materiale vaporizzata. Tutto ciò comporta il danneggiamento della superficie del campione, limitando molto l'effettivo impiego del regime ablativo nella generazione di ultrasuoni.

2.3. Interazione dell'onda all'interfaccia (riflessione e rifrazione)

Al fine di prevedere il comportamento dell'onda all'interno del componente analizzato è importante conoscere la sua interazione con i bordi del pezzo, in particolare i fenomeni che si verificano sono quello della riflessione e della rifrazione.

Si ha infatti che quando un'onda incontra la superficie che separa due mezzi materiali differenti con angolo di incidenza perpendicolare, parte di quest'onda viene riflessa all'interno del primo in direzione della fonte, la restante parte verrà trasmessa al secondo mezzo. Il rapporto tra le percentuali di onda riflessa e rifratta dipende dall'impedenza acustica relativa dei due mezzi materiali.

Si definisce così il coefficiente di riflessione (espresso in percentuale) come:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{6}$$

Dove Z_1 e Z_2 sono le impedenze acustiche dei due mezzi materiali

È possibile notare come più le impedenze acustiche dei due mezzi sono simili tanto più gande è la parte di onda trasmessa, viceversa nel caso in cui i due materiali siano molto diversi, come acciaio e aria, gran parte dell'onda viene riflessa all'interno del primo.

Nel caso più generale in cui l'angolo di incidenza non sia perpendicolare alla superficie di separazione parte dell'onda verrà riflessa all'interno del primo mezzo con angolo pari a quello di incidenza, mentre la parte trasmessa andrà incontro al fenomeno della rifrazione seguendo la legge di Snell. Questa legge si basa sul seno dell'angolo di incidenza e sul seno dell'angolo di rifrazione in funzione delle velocità di propagazione nei due mezzi.

$$\frac{sen(\theta_1)}{sen(\theta_2)} = \frac{v_1}{v_2} \tag{7}$$

Dove θ_1 e θ_2 sono rispettivamente gli angoli di incidenza e di rifazione,
v_1 e v_2 le velocità di propagazione nei due mezzi

Abbiamo inoltre che nel caso in cui il mezzo permetta la propagazione di onde trasversali e superficiali, quest'ultime andranno integrate nella trattazione. Nello specifico avremo che un'onda longitudinale colpendo la superfice di interfaccia tra due mezzi materiali verrà riflessa con angolo pari all'angolo di incidenza e rifratta secondo la legge di Snell ma avremo anche la generazione di un'onda trasversale riflessa e rifratta e in particolari condizioni anche di un'onda superficiale. Viceversa, nel caso sia un'onda trasversale ad incontrare l'interfaccia quest'ultima verrà riflessa e rifratta come onda trasversale ma anche come onda longitudinale.

Anche in questo caso gli angoli di riflessione e rifrazione si ricavano tramite la legge di Snell sfruttando le relative velocità di propagazione.

$$\frac{sen(\theta_i)}{v_i} = \frac{sen(\theta_L)}{v_L} = \frac{sen(\theta_T)}{v_T} \tag{8}$$

Dove θ_i ; θ_L ; θ_T sono rispettivamente l'angolo di incidenza,
e l'angolo dell'onda longitudinale e trasversale riflessa o rifratta

Nel caso in esame si ha che nel passaggio da acciaio all'aria, non essendo la seconda un mezzo capace di resistere a sforzi di taglio e quindi trasmettere onde traversali e superficiali, permetterà la trasmissione delle sole onde longitudinali.

2.4. Ricezione delle onde ultrasonore

Per rilevare un'onda ultrasonora, ma in generale qualsiasi tipo di onda, si utilizzano delle sonde specifiche che possono essere piezoelettriche o elettro capacitive.

Le prime sfruttano un cristallo con proprietà piezoelettriche, capace quindi di convertire un segnale in tensione in un movimento meccanico del cristallo (in genere una piccola variazione in lunghezza o spessore) e viceversa.

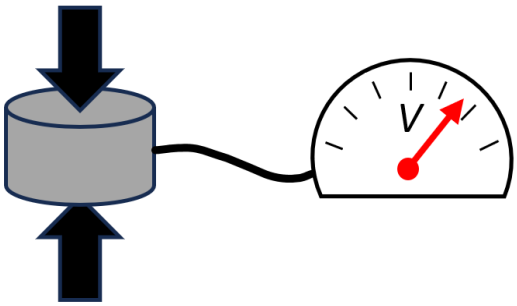


Figura 3.Sonda piezoelettrica

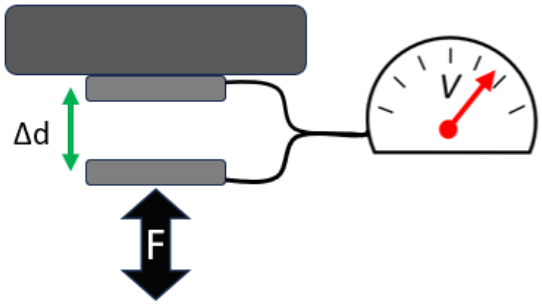


Figura 4.Sonda elettro capacitiva

Le seconde invece sfruttano le proprietà di un condensatore, in particolare la variazione di capacità al variare della distanza delle due armature, si avrà quindi un'armatura fissa ed una mobile, quest'ultima verrà mossa dall'onda incidente provocando una variazione della capacità del condensatore, rivelabile in uscita con un segnale in tensione.

Entrambe le tipologie di trasduttore presentano due parametri fondamentali, la frequenza propria e la larghezza di banda, i quali dipendono dalle caratteristiche fisiche delle sonde, e sono di cruciale importanza nella scelta più appropriata di quest'ultime per ogni specifico utilizzo, poiché definiscono il range ottimale di rilevazione, ad esempio la sonda utilizzata in laboratorio presentava una frequenza propria di 1.68 MHz e larghezza di banda compresa tra 1.4 MHz e 2 MHz, la scelta è stata guidata dalla necessità di rilevare a frequenze più alte di quanto fatto precedentemente al fine di aumentare la risoluzione della scansione andando ad eliminare eventuali fenomeni diffrattivi che potrebbero ridurre la zona d'ombra dovuta alla presenza del difetto.

3. Set-up sperimentale

Per la sperimentazione in laboratorio si è utilizzato un laser per la generazione delle onde sul binario, una sonda elettro capacitiva, un robot cartesiano per la movimentazione del pezzo ispezionato e un sistema software per l'acquisizione dei dati.

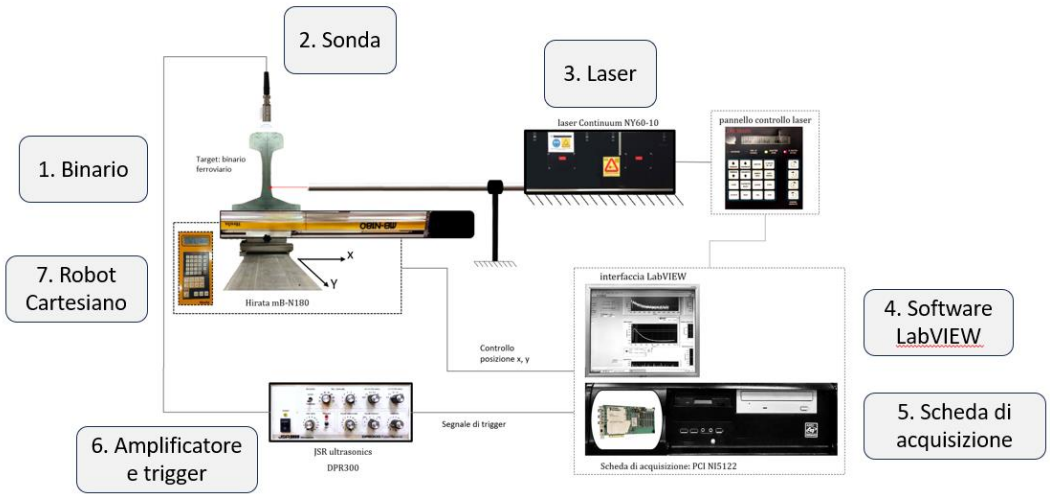


Figura 5. Set-up di misura

3.1. Laser Continuum NY60-10

Il laser Continuum NY60-10 è un laser allo stato solido di tipo Nd:YAG Q-swiched. Sfrutta un cristallo solido di granato di ittrio e alluminio (YAG) drogato al neodimio (Nd), la lunghezza d'onda emessa si trova nell'infrarosso e può lavorare sia in regime continuo che, come effettuato in laboratorio, ad impulsi (Q-switched). In questo secondo caso all'interno della cavità risonante è presente un commutatore ottico che rimane chiuso fino a che non viene raggiunta la massima inversione di popolazione, aprendosi fa sì che il laser scarichi un impulso ad alta potenza nell'ordine dei Megawatt per una durata di pochi nanosecondi.

Laser Continuum NY60-10

Lunghezza d'onda	**1064 nm**
Energia dell'impulso	**225 mj**
Repetition rate	**10 Hz**
Durata impulso	**7ns**
Diametro raggio laser	**6mm**

3.2. Sonda CMUT

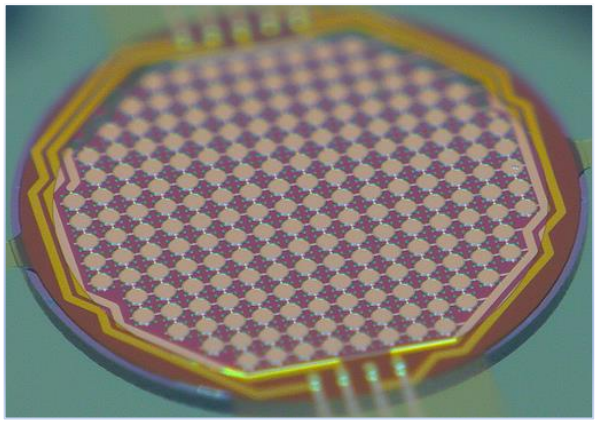


Figura 6. Celle capacitive sonda CMUT

La sonda CMUT (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers) è di tipo elettro capacitivo, sfrutta quindi le proprietà elettriche del condensatore, in particolare la variazione di capacità dovuta all'oscillare di una delle due armature. Queste sonde sono realizzate tramite tecniche di estrema precisione che prevedono la stesura di molteplici strati ed incisione degli stessi su un substrato di silicio, permettendo così un'ottima sensibilità di ricezione e una grande accuratezza nella calibrazione delle proprietà acustiche. Inoltre, le dimensioni estremamente ridotte dei singoli elementi capacitivi permettono di raggrupparne un grande numero all'interno di un singolo trasduttore estendendone così la larghezza di banda. L'utilizzo di questi trasduttori ha permesso una ricezione più precisa ed accurata delle onde ultrasonore grazie ad un migliore rapporto segnale-rumore rispetto alle sonde piezoelettriche.



Figura 7. Sonda CMUT

3.3. Robot cartesiano Hirata

La movimentazione del componente esaminato è effettuata tramite un robot cartesiano a due gradi di libertà (X; Y). La risoluzione è 0.5 mm e una escursione massima di 500 mm. Durante i test il movimento è controllato dal computer, il quale ne interfaccia il movimento con le acquisizioni richieste ad ogni punto, nel caso in esame 150. Il robot permette di spostare il componente lasciando invariate le posizioni di laser e sonda, di ben più complessa movimentazione.

4. Difetti analizzati

La sperimentazione è stata effettuata su spezzoni di binari ferroviari, ai quali sono stati creati dei difetti campione esemplificativi di difettosità vere e proprie, al fine di ricreare delle condizioni ideali per la messa a punto di questa tecnologia.

I binari analizzati sono stati due, uno corto (280 mm) in figura 8 e uno più lungo (450 mm) in figura 9.



Figura 8. Binario corto



Figura 9. Binario lungo

Il binario più corto presenta due difetti, un intaglio sulla testa e un intaglio sul piede, entrambi sono stati effettuati con una smerigliatrice angolare con disco da taglio e presentano una larghezza di circa 1.5 mm, il binario medio invece presenta due fori dello stesso diametro, uno passante alla base del gambo, ed uno profondo 22 mm a lato della testa, ed un intaglio sotto il piede, anche questo effettuato tramite smerigliatrice angolare.

Di seguito sono riportati gli ingrandimenti dei singoli difetti.

Binario corto:



Figura 10. Difetto della testa



Figura 11. Difetto del piede

Binario lungo:



Figura 12. Difetto del piede

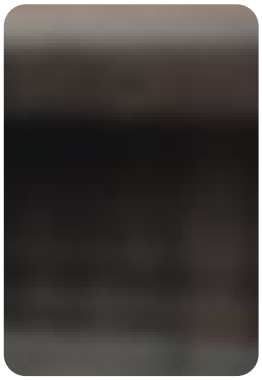


Figura 14. Difetto della testa

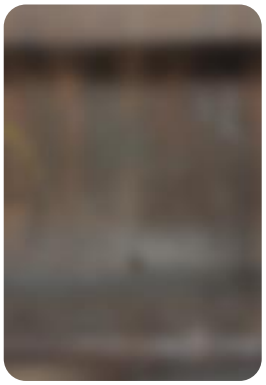


Figura 13.Difetto del gambo

I singoli difetti presenti sui binari presentano ovviamente difficoltà di rilevazione differenti al fine di testare al meglio le capacità della tecnica Laser Ultrasonics. Sicuramente rilevare un difetto lontano dalla superficie di rilevazione del trasduttore e lontano anche dalla superficie di generazione delle onde è più complesso e richiede maggiore precisione rispetto ad un difetto molto più vicino. In più essendo i campioni in esame spezzoni di rotaia ha molto più valore identificare difetti non facilmente visibili dall'alto, questo perché in un contesto di effettivo controllo della linea ferroviaria i binari non possono ovviamente essere smontati, non consentendo di vedere eventuali difetti nascosti nel bordo inferiore della rotaia. Nel caso in esame sarebbe, quindi, di estremo valore riuscire a identificare i difetti presenti sui piedi delle due rotaie, pur essendo i più complessi da rilevare.

5. Prove effettuate

La sperimentazione in laboratorio aveva il fine di individuare dei set-up che fossero interessanti dal punto di vista dei risultati ottenuti. Per set-up si intende il posizionamento di sonda e spot laser sul binario. Variando infatti la pozione dello spot laser è possibile ottenere una diversa propagazione delle onde all'interno del binario, modificando la posizione della sonda è possibile cambiare la modalità di ricezione delle onde.

Sono stati sperimentati tre set up;

5.1 Set-up 1



Figura 15. Set-up 1

Il primo set-up ha interessato il binario più corto, il quale è stato posizionato orizzontalmente per permettere al laser di colpirlo al centro della testa, la sonda è stata anch'essa posizionata sulla testa del binario. Con questa configurazione sono state effettuate 8 prove, tra ognuna di queste la sonda è stata riposizionata, spostandola verticalmente in direzione del difetto della testa, andando quindi a modificare il valore di ΔZ in fig. 16 da 0 mm a 30 mm.



Figura 16. Set-up 1 vista in sezione



Figura 17. Set-up 1 vista prospettica

Durante la scansione la posizione reciproca di laser e sonda rimane invariata, essendo entrambi montati su di un supporto fisso, il binario con il suo movimento permette di effettuare la scansione lungo tutta la sua lunghezza. In figura 17 sono riportate le posizioni

dei difetti, usando come riferimento le coordinate del robot cartesiano al quale è stata affidata la movimentazione. La sonda invece si trova a precedere il laser lungo la direzione di scansione di qualche decina di millimetri (valore ΔY) e scostata dalla testa del binario (valore ΔX) di circa 4 mm al fine di evitare contatti accidentali con quest'ultimo. I valori esatti del parametro ΔY saranno riportati con precisione per ogni singola prova effettuata.

5.1.1. Studio dei tempi di volo

Al fine di comprendere al meglio i risultati riportati sotto è di fondamentale importanza effettuare lo studio dei tempi di volo delle onde longitudinali e trasversali che si propagano all'interno binario.



Figura 18. Tempi di volo onde longitudinali e trasversali

A lato, in figura 18, è riportata una visione semplificata della sezione del binario dove possiamo notare l'impulso laser in rosso che colpisce la testa del binario, la sonda in blu, anch'essa sulla testa del binario e in azzurro i cammini delle onde che si propagano all'interno del metallo. Il cammino rappresentato è il più semplice di tutti i possibili che potrebbero risentire della presenza di un difetto della zona del piede del binario. Considerare un unico rimbalzo delle onde sulla base del binario ci permette di semplificare di molto i calcoli ma senza commettere un errore troppo significativo, inquanto, all'allungarsi del percorso compiuto dalle onde diminuisce la loro intensità e di conseguenza la capacità di portare un'informazione che possa essere rilevabile dalla sonda.

L'altezza del binario è di circa 172 mm, il cammino percorso all'interno del binario è quindi di 344 mm, a questo va aggiunto lo spazio che si interpone tra la testa del binario e la sonda (valore ΔX) di circa 4 mm.

Le velocità delle onde nel binario sono note a priori e pari a 5900 $\frac{m}{s}$ per le longitudinali e 3230 $\frac{m}{s}$ per quelle trasversali. In aria invece le uniche onde a propagarsi sono di tipo longitudinale e hanno velocità di 330 $\frac{m}{s}$.

Utilizzando le formule del moto rettilineo e uniforme:

$$tempo\ di\ volo = \frac{S_b}{v_b} + \frac{S_a}{v_a} \tag{9}$$

Dove S_b e S_a sono rispettivamente i cammini all'interno del binario e in aria.
E v_b e v_a sono le velocità nel binario e in aria.

Abbiamo che i tempi di volo risultano pari e circa 60-70 µs per le onde longitudinali e 90-110 µs per le onde trasversali.

Per quanto riguarda le onde superficiali lo studio da effettuare è differente, poiché quest'ultime non si propagano all'interno del binario ma solamente sulla superficie esterna.



Figura 19. Tempi di volo onde superficiali

Come nel caso precedente la freccia rossa rappresenta l'impulso laser, la sonda è raffigurata in blu e la freccia azzurra rappresenta il cammino delle onde superficiali.

Anche in questo caso la velocità di propagazione delle onde è nota a priori e tabulata, pari a 2790 $\frac{m}{s}$. La lunghezza del cammino delle onde varierà a seconda della specifica prova da un minimo di 20 mm ad un massimo di circa 60 mm. La distanza della sonda dalla testa del binario è rimasta di circa 4 mm.

Utilizzando nuovamente le formule del moto rettilineo uniforme:

$$tempo\ di\ volo = \frac{S_s}{v_s} + \frac{S_a}{v_a} \tag{10}$$

Dove S_s e S_a sono rispettivamente i cammini sulla superficie del binario e in aria.
E v_s e v_a sono le velocità sulla superficie del binario e in aria.

Otteniamo quindi la stima dei tempi di volo per le onde longitudinali che a seconda della specifica prova si aggirano tra 28-30 µs (prova 1) ad un massimo di circa 40 µs (prova 8).

Lo studio fatto rimane valido anche per il Set-Up 2 essendo geometricamente simile.

5.1.2 Risultati Set-up 1

Prova 1

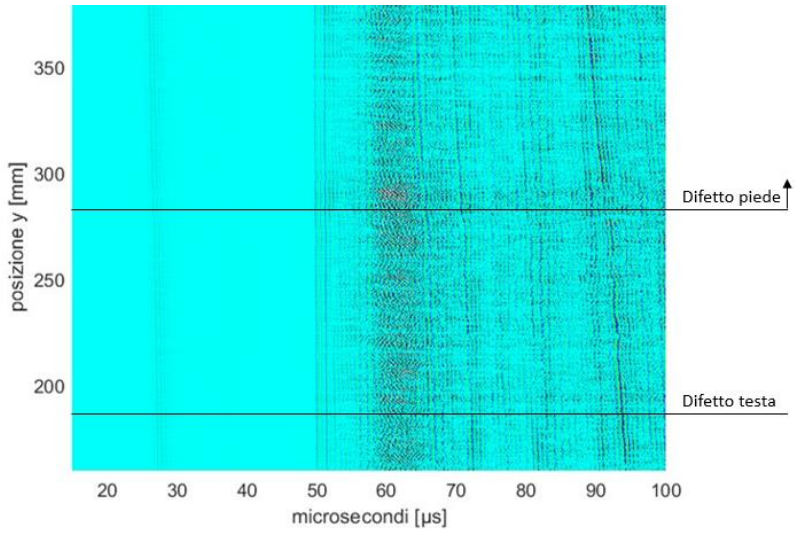


Figura 21. Set-up 1 Prova 1 B-Scan



Figura 20. Sonda Set-Up 1 prova 1

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=0 mm

Per la prova numero 1 la sonda è stata posizionata al centro della testa (ΔZ=0 mm). In figura 21 sono stati riportati i riferimenti dei difetti. Possiamo notare come il primo fronte d'onda arrivi dopo appena 28 µs (onde superficiali dirette), ma già da 50 µs il segnale diventa molto disturbato a causa dell'arrivo alla sonda dell'onda in aria che va a coprire le onde longitudinali e trasversali che dallo studio dei tempi di volo avrebbero dovuto raggiungere la sonda all' incirca tra i 60-70 µs per le longitudinali e 90-110 µs per le trasversali. Ciò è avvenuto a causa della vicinanza dello spot laser e la sonda, di circa 22 mm, era stato fatto ciò al fine di garantire una maggiore intensità di segnale alla sonda in modo da ottenere una rappresentazione più chiara.



Figura 22. Distanza ΔY

Per ovviare al problema risulta necessario quindi che la loro distanza reciproca (valore ΔY) superi i 45 mm, consentendoci di riceve le onde portatrici di una possibile informazione senza il disturbo del suono in aria, come mostrato in figura 22.

A questa prima prova ne è stata quindi affiancata una seconda che rispettasse questa nuova limitazione.

Prova 2



Figura 24. Sonda Set-Up 1 prova 2

ΔX=4 mm

ΔY=50mm

ΔZ=0 mm

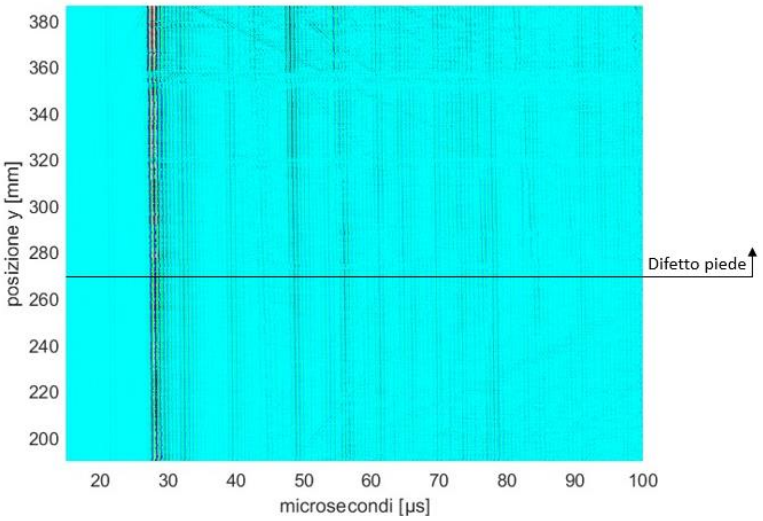


Figura 23. Set-up 1 Prova 2 B-Scan

In questa seconda prova possiamo subito notare come ora il segnale sia privo didisturbi provocati dall'onda sonora in aria. Per quanto riguarda l'identificazione dei difetti anche in questo caso i risultati non sono stati quelli attesi, si può notare una perturbazione del segnale intorno ad Y=360 ma che non è riconducibile al difetto presente sul binario.

Prova 3

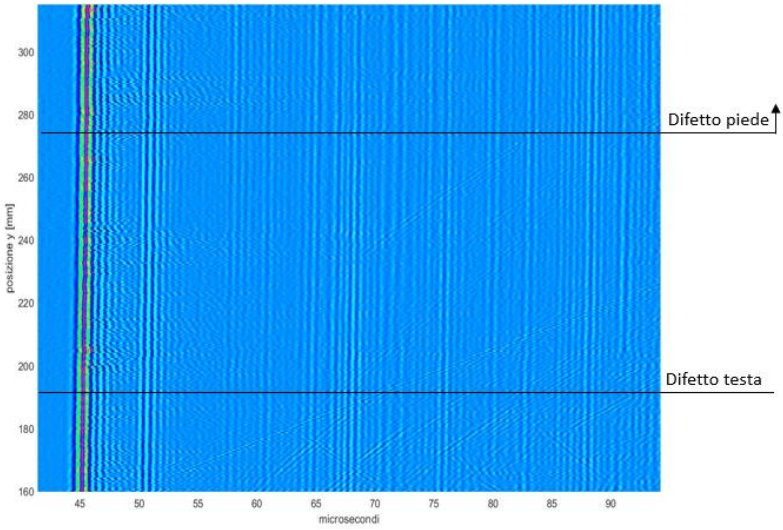


Figura 27. Set-up 1 Prova 3 B-Scan



Figura 26. Sonda Set-Up 1 prova 3

ΔX=4 mm

ΔY=50mm

ΔZ=5 mm

Nella prova numero 3 la sonda è stata spostata di 5 mm in direzione del difetto presente sulla testa del binario al fine di migliorarne le possibilità di rilevarlo.

Vediamo, purtroppo, come la modifica alla configurazione della sonda non abbia portato nessun significativo aumento nella qualità della visualizzazione del difetto che rimane non rilevato. Anche il difetto di piede non viene visualizzato.

Prova 4



Figura 28. Sonda Set-Up 1 prova 4

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=10 mm

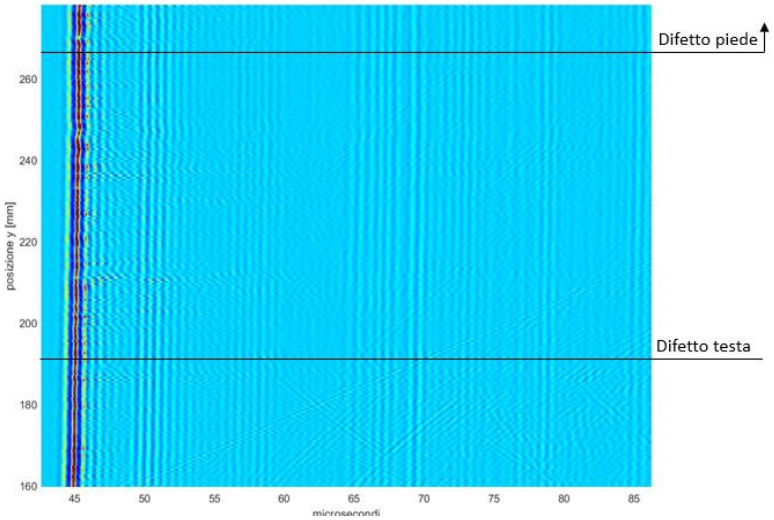


Figura 29. Set-up 1 Prova 4 B-Scan

In questa prova la distanza ΔZ è stata portata a 10 mm e possiamo finalmente notare una piccola distorsione nel segnale in arrivo dovuto alla presenza del difetto sulla testa. La perturbazione rimane molto limitata e di piccola intensità.

Prova 5

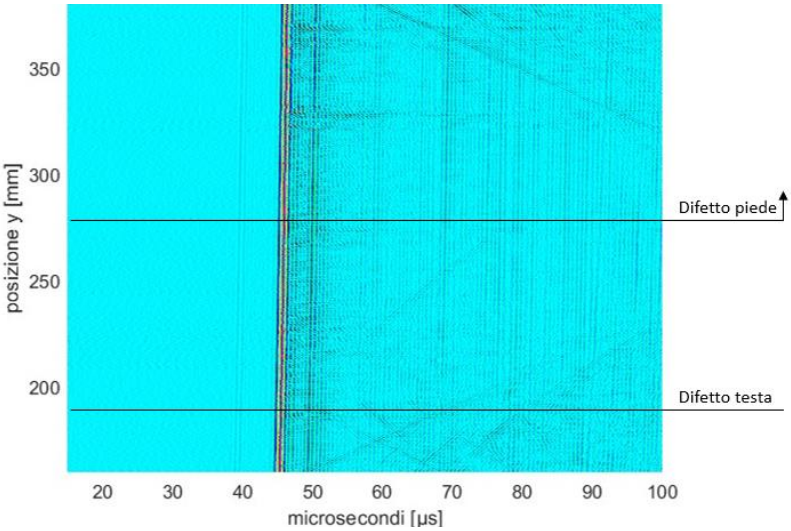


Figura 31. Set-up 1 Prova 5 B-Scan



Figura 30. Sonda Set-Up 1 prova 5

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=10 mm

Per la prova 5 la sonda è stata spostata di 15 mm in direzione del difetto presente sulla testa del binario. In questa prova si inizia a definire meglio la presenza del difetto della testa del binario, sono infatti presenti dei fenomeni di scattering riconducibili all'interazione dell'onda con quest'ultimo.

Prova 6



Figura 32. Sonda Set-Up 1 prova 6

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=10 mm

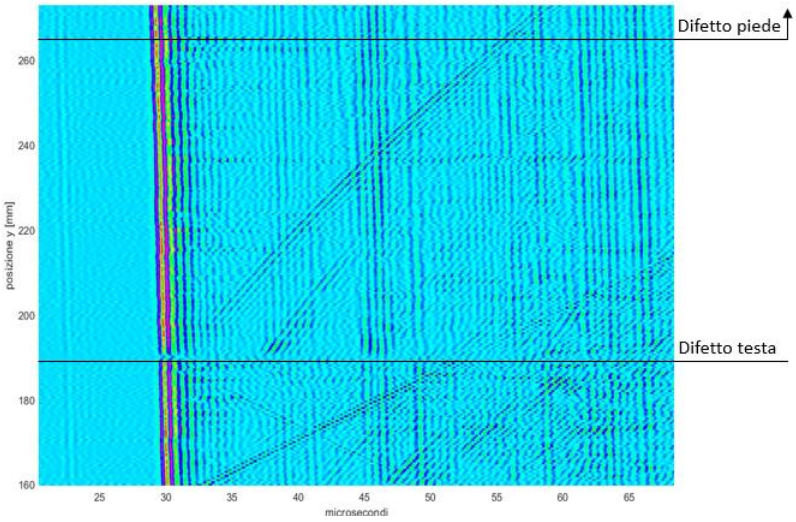


Figura 33.Set-up 1 Prova 6 B-Scan

Per la prova 6 la distanza ΔZ è stata portata a 20 mm. In questo caso il difetto presente sulla testa risulta facilmente visibile ed individuabile, è possibile notare una netta discontinuità nel segnale in arrivo delle onde, in particolare delle superficiali, meno per longitudinali e trasversali.

Prova 7

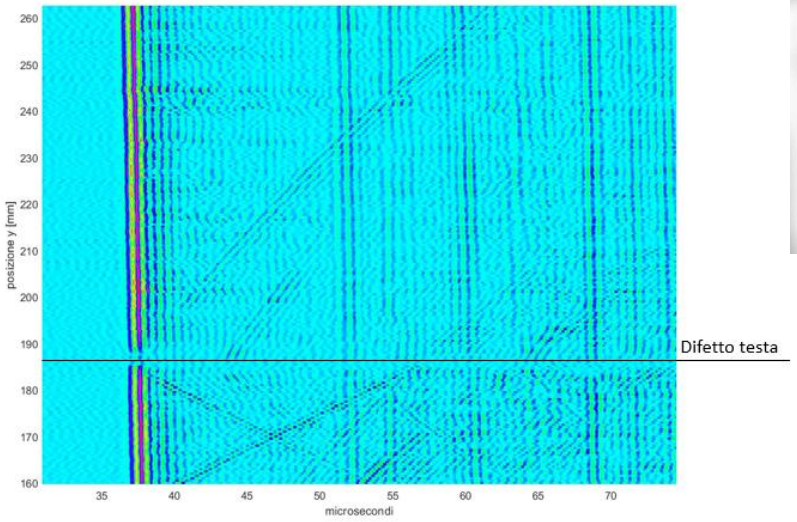


Figura 35.Set-up 1 Prova 7 B-Scan



Figura 34. Sonda Set-Up 1 prova 7

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=0 mm

Nella settima prova la distanza ΔZ è stata portata a 25 mm. In questa prova continua la tendenza che abbiamo potuto riscontrare nelle prove precedenti, la rilevazione del difetto appare sempre più chiara all'aumentare della vicinanza dello stesso dalla sonda. In questo caso abbiamo una discontinuità che interessa tutte e tre i tipi di onde: superficiali,

longitudinali e trasversali. In questo caso non è stato riportato il difetto presente nel piede del binario, rimasto al difuori dell'area di scansione.

Prova 8



Figura 36. Sonda Set-Up 1 prova 8

ΔX=4 mm

ΔY=22mm

ΔZ=10 mm

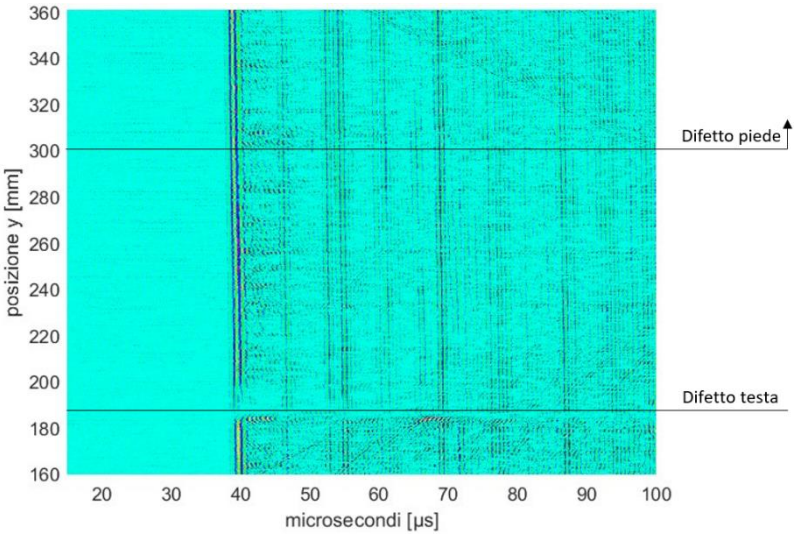


Figura 37. Set-up 1 Prova 8 B-Scan

Per quest'ultima prova la sonda è stata spostata ulteriormente in direzione del difetto di testa. In quest'ultima prova emerge chiaramente la presenza del difetto sulla testa del binario, come per la prova precedente si ha una discontinuità nella ricezione del segnale che interessa sia le onde superficiali che longitudinali e trasversali. Per il difetto nel piede del binario anche in questo caso non viene rilevato nulla.

5.2. Set-up 2

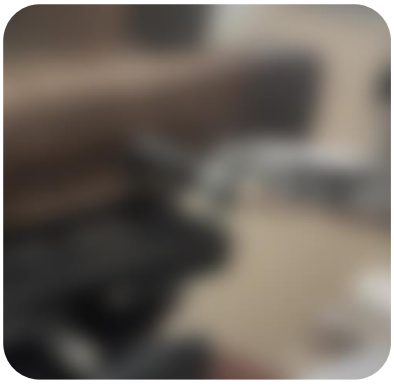


Figura 38. Set-up 2

Il secondo Set-up ha interessato il binario più lungo, il quale è stato posizionato orizzontalmente per permettere anche in questo caso al laser di colpirlo al centro della testa, la sonda è stata posizionata nuovamente sulla testa del binario in maniera analoga al Set-up 1. Con questa configurazione sono state svolte sette prove, alcune di queste hanno interessato l'intera lunghezza del binario altre solamente una parte, andando a concentrare la scansione in prossimità del difetto scelto.

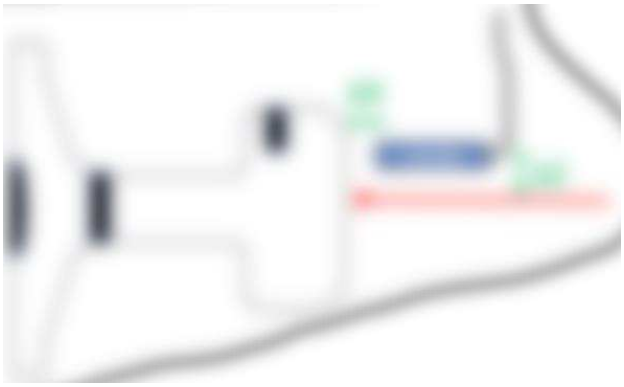


Figura 39. Set-up 2 vista in sezione

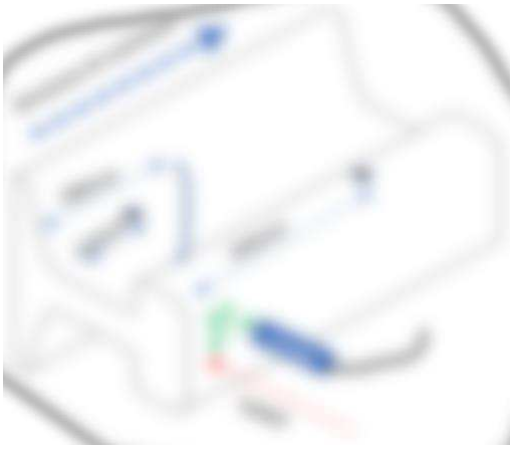


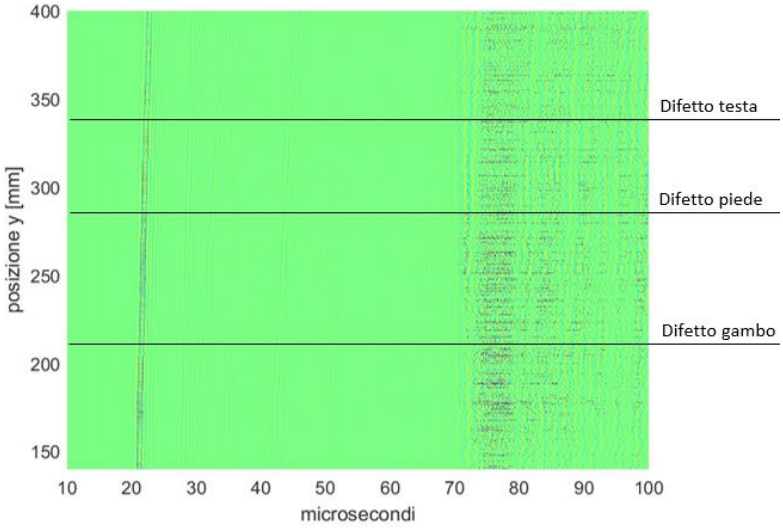
Figura 40. Set-up 2 vista prospettica

Come per il Set-up 1 è il binario a muoversi durate la scansione, ed anche in questo caso la sonda precede il laser lungo la direzione di scansione (ΔY). La posizione dei difetti è riportata in figura 40 utilizzando come riferimento le coordinate del robot di movimentazione.

5.2.1. Risultati Set-up 2

I risultati delle prove riportate in seguito sono: tre scansioni generali (prova 1-2-3); tre specifiche per il difetto di testa (prova 4-5-6); ed una per il difetto di gambo (prova 7).

Prova 1



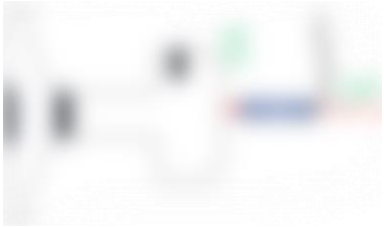


Figura 41. Sonda Set-Up 2 prova 1

ΔX=4 mm

ΔY=30mm

ΔZ=0 mm

Figura 42. Set-up 2 Prova 1 B-scan

Per questa prova la sonda è stata posizionata al cenro della testa (ΔZ=0) e a precedere il laser di 30 mm (ΔY=30). Si nota immediatamente come anche qui è stato commesso lo stesso errore della prima prova del primo Set-Up ovvero la vicinanza della sonda allo spot laser ha ha fatto si che l'onda sonora in aria coprisse il segnale d'iteresse rendendo inutilizzabile i risultati della prova.

Prova 2

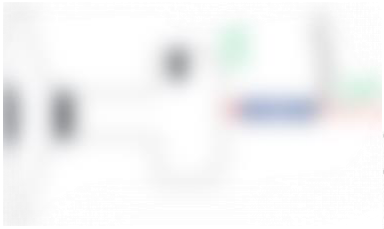


Figura 43. Sonda Set-Up 2 prova 2

ΔX=4 mm

ΔY=55 mm

ΔZ=0 mm

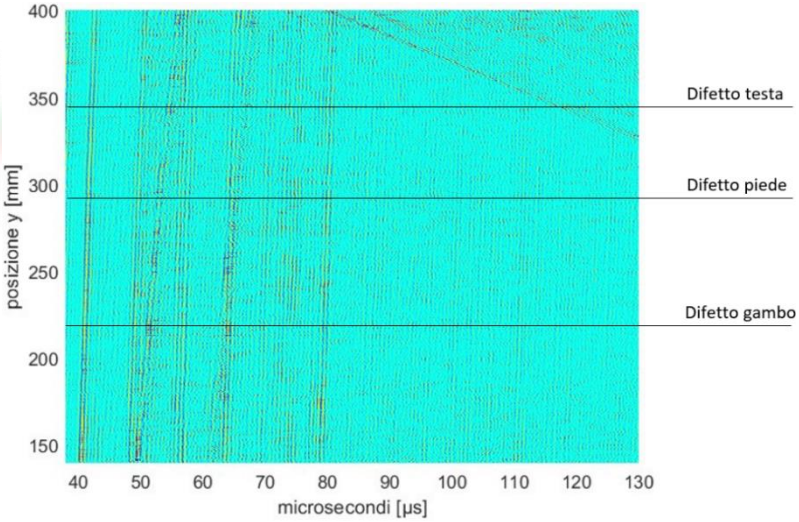


Figura 44. Set-up 2 Prova 2 B-Scan

Per questa prova la sonda è stata posizionata al cenro della testa (ΔZ=0) e a precedere il laser di 55 mm (ΔY=55). Questa prova ha interessato l'intera lunghezza del binario, la sonda è stata posizionata sufficientemente lontana dallo spot laser in modo che il suono diretto in aria non coprisse il segnale di interesse. Tuttavia, non è possibile notare nessuna perturbazione del segnale riconducibile ad uno dei difetti presenti sul binario. La perturbazione presente in alto a destra (linea diagonale) è con tutta probabilità dovuta alla riflessione delle onde con la fine dello spezzone di binario.

Prova 3

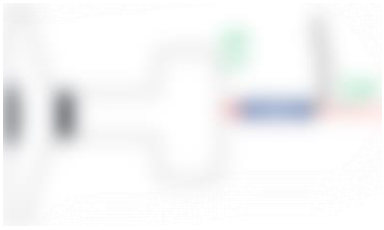


Figura 45. Sonda Set-Up 2 prova 3

ΔX=4 mm

ΔY=25 mm

ΔZ=25 mm

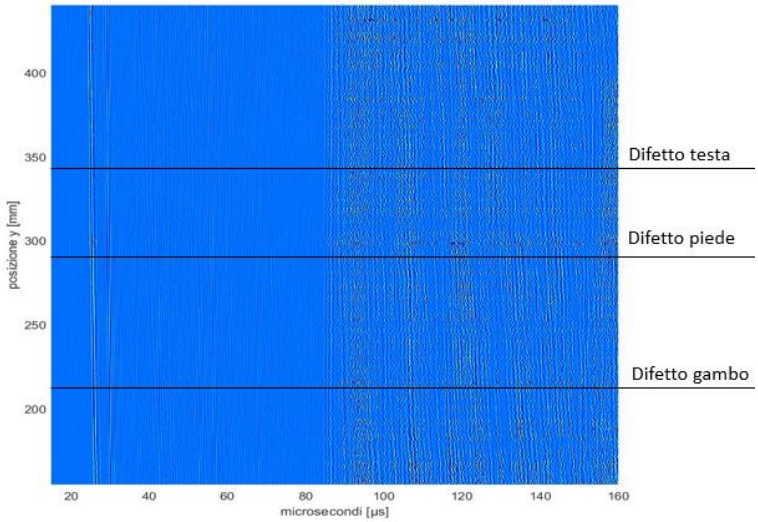


Figura 46. Set-up 2 Prova 3 B-Scan

La terza prova è stata una scansione generale utilizzando i seguenti parametri (ΔZ=25) (ΔY=25). Nessun difetto è stato rilevato.

Prova 4

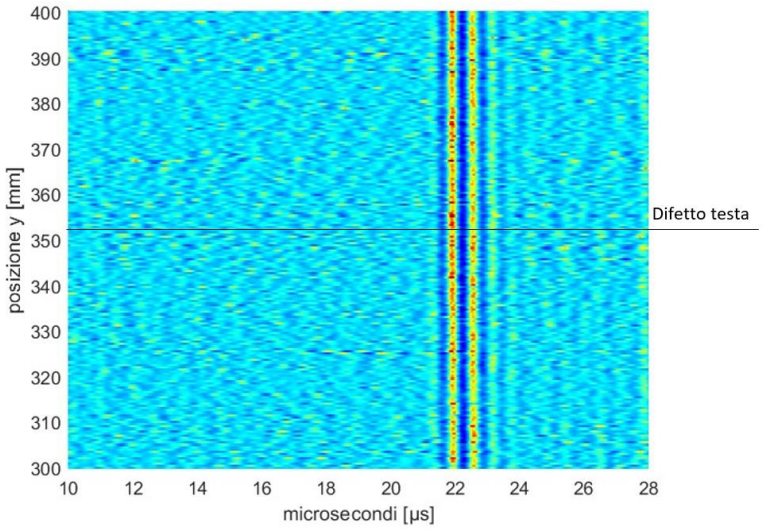


Figura 48. Set-up 2 Prova 4 B-Scan

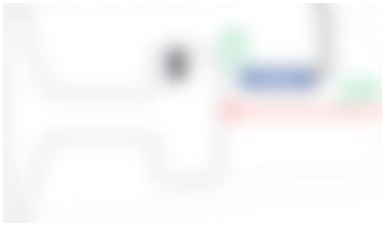


Figura 47. Sonda Set-Up 2 prova 4

ΔX=4 mm

ΔY=45mm

ΔZ=20 mm

Questa quarta prova è stata incentrata nella rilevazione del difetto presente sulla testa del binario (un foro profondo 22 mm), la sonda è stata, infatti, spostata di 20 mm in direzione del difetto (ΔZ=20) e ad una distanza ΔY di 45 mm. Al fine di rielaborare al meglio i dati ottenuti l'immagine è stata scalata andando ad indagare solamente un lasso temporale concorde ai tempi di volo delle onde longitudinali e trasversali, ovvero 20 µs per le prime e 27 µs per le seconde. Purtroppo, però questa scansione non ha portato risultati, la posizione del foro risulta essere troppo lontana per essere rilevata.

Prova 5

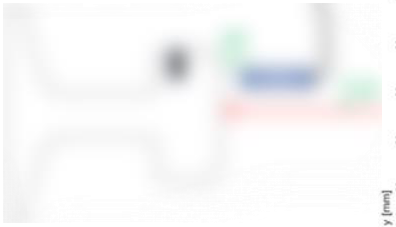


Figura 50. Sonda Set-Up 2 prova 5

ΔX=4 mm

ΔY=45 mm

ΔZ=25 mm

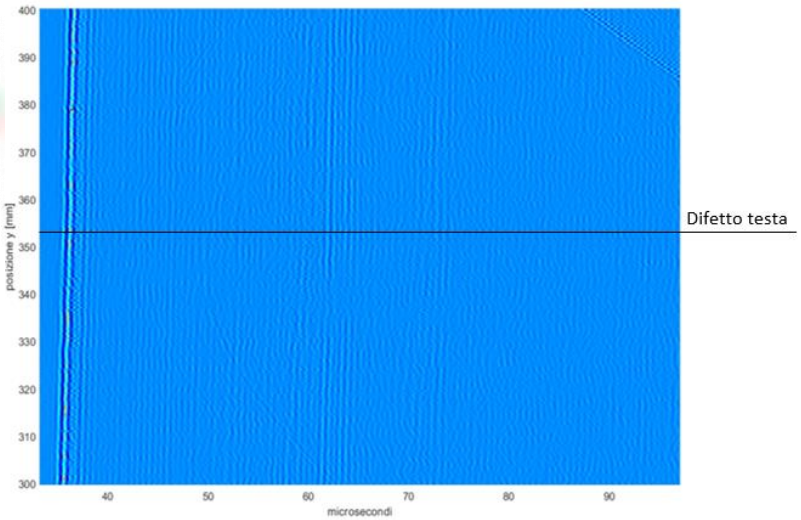


Figura 49. Set-up 2 Prova 5 B-Scan

Per questa prova è la sonda è stata avvicinata al difetto (ΔZ=25) (ΔY=45). In questo caso, come nella prova precedente non sono emersi risultati rilevanti per l'identificazione del difetto presente sulla testa (foro profondo 22 mm), può essere notata solamente una leggerissima perturbazione del segnale tra 50 e 60 µs

Prova 6

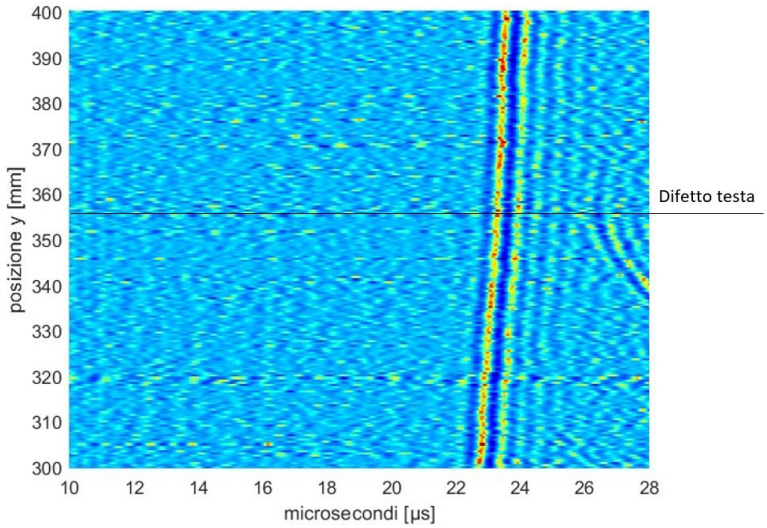


Figura 52. Set-up 2 Prova 6 B-Scan

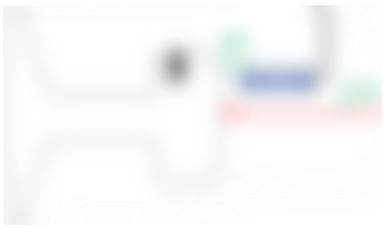


Figura 51. Sonda Set-Up 2 prova 6

ΔX=4 mm

ΔY=45 mm

ΔZ=30 mm

In questa prova la sonda è stata avvicinata ulteriormente al difetto (ΔZ=30) (ΔY=45), questo ha permesso una parziale rivelazione dello stesso, possiamo infatti notare un fenomeno di scattering dovuto all'interazione del difetto con le onde incidenti.

Prova 7

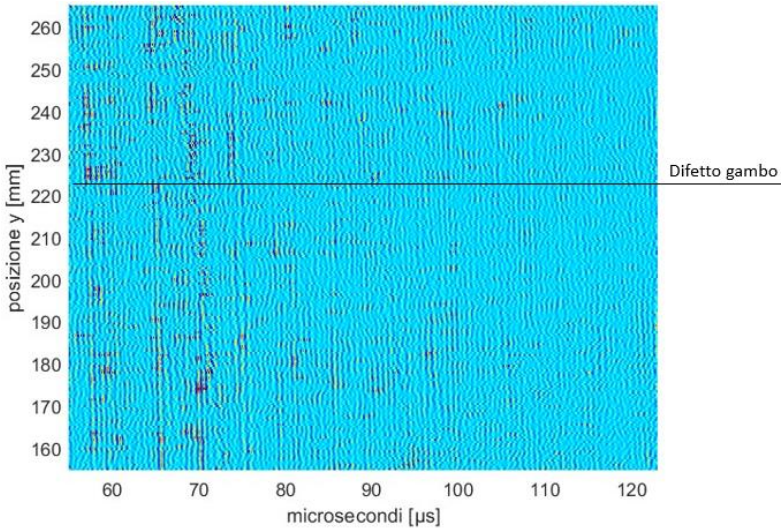


Figura 54. Set-up 2 Prova 7 B-Scan

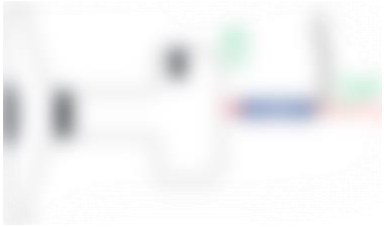


Figura 53. Sonda Set-Up 2 prova 7

ΔX=4 mm

ΔY=45 mm

ΔZ=0 mm

Durante questa prova la sonda è rimasta centrata sulla testa del binario (ΔZ=0) e a precedere il laser di 45 mm (ΔY=45). Questa prova aveva l'obiettivo di rilevare il difetto presente sulla base del gambo del binario (un foro passante), come si evince dalla figura quest'ultimo non è stato rilevato. È presente però una zona di discontinuità nei pressi della coordinata Y=250, la quale potrebbe essere dovuta all'interazione con il difetto del piede del binario; infatti, andando a considerare la posizione della sonda e ricordando che le coordinate in foto fanno riferimento alla posizione del laser, abbiamo che nel momento in cui quest'ultimo si trova ad Y=250 la sonda, precedendolo di 45 mm, sarà già in prossimità del difetto del piede ad Y=280. Potrebbe quindi aver risentito della presenza del difetto, non abbiamo però nessuna evidenza che questa ipotesi sia corretta.

5.3. Set-up 3



Figura 55. Set-up 3

Questo set-up ha interessato il binario più lungo, il quale è stato posizionato verticalmente per permettere al laser di colpirlo sul gambo e posizionare la sonda a lato della testa, scontrata al laser. Con questa configurazione sono state effettuate sei prove, ruotando, tra le prime tre e le seconde tre, il binario di 180° sull'asse verticale. Cambiando i riferimenti dei difetti tra le prove saranno riportate le due configurazioni separatamente.

5.3.1. Set-Up 3.1

Per questa prima prova il laser è stato puntato sullo stesso lato del binario su cui si trova il difetto di testa, come mostrato in figura 56, e ad una distanza ΔZ' al di sotto della testa del binario. La sonda si trovava sul lato opposto, posizionata orizzontalmente al centro del lato della testa del binario, il valore ΔX è rimasto pari a circa 4 mm al fine di minimizzare la dispersione dell'onda in aria. Nelle prove è stata fatto variare il valore ΔZ' tra zero (spot laser che colpisce la base della testa), 10 mm e 20 mm.



Figura 56. Set-up 3 Prova 1 vista in sezione



Figura 57. Set-up 3 Prova 1 vista prospettica

Anche in questo caso i riferimenti dei difetti sono stati presi utilizzando le coordinate del robot cartesiano di movimentazione. Laser e sonda sono allineati lungo la direzione di scansione Y.

5.3.2. Risultati Set-up 3.1

Prova 1



Figura 58. Sonda Set-Up 3.1 prova 1

ΔX'=4 mm

ΔZ'=0 mm

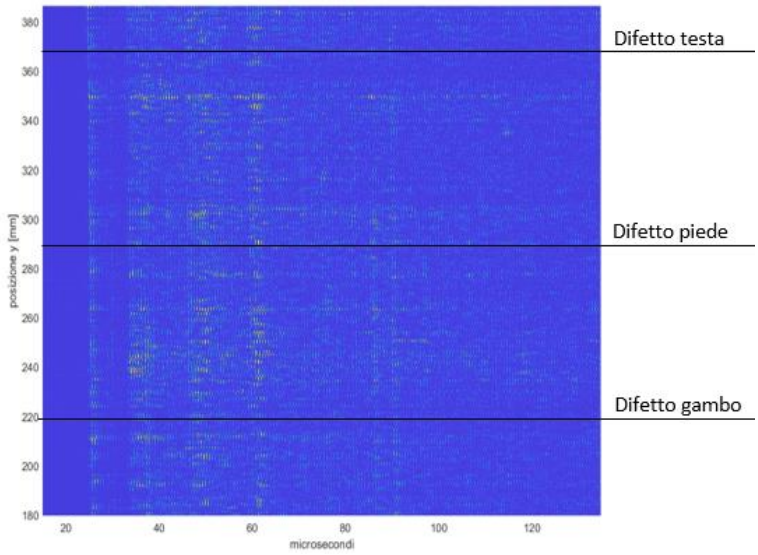


Figura 59. Set-up 3.1 Prova 1 B-Scan

Questa prima prova è stata di carattere generale, il fascio laser è stato puntato alla base della testa del binario, come mostrato in figura 59. Dai risultati si può vedere come nessun difetto sia stato rilevato, sembra esserci una leggera discontinuità nel segnale in prossimità del difetto presente sulla testa ma l'intensità della perturbazione è troppo bassa per trarne un'informazione utile. È però possibile notare come con questa configurazione di laser e sonda non ci sia nessuna possibilità di incorrere in problemi dovuti all' interferenza del suono in aria, abbiamo infatti che la sonda si trova ad una distanza tale per cui il l'onda sonora impiega sempre molto più tempo rispetto alle onde che attraversano il binario con velocità di almeno un ordine di grandezza più elevate.

Prova 2

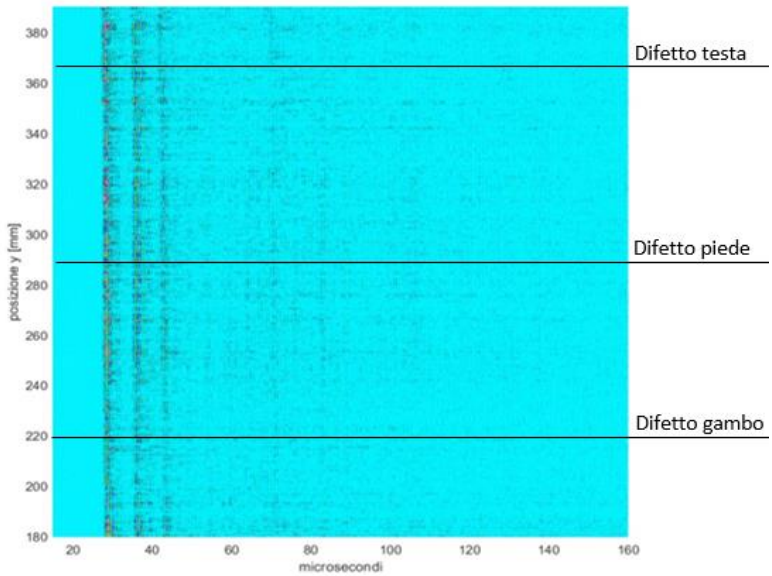




Figura 60. Sonda Set-Up 3.1 prova 2

Figura 61. Set-up 3 Prova 2 B-Scan

ΔX'=4 mm

ΔZ'=10 mm

Per la prova numero due lo spot laser è stato spostato di 10 mm verso il basso come mostrato in figura 60 (ΔZ'=10 mm). Anche in questo caso nessuno dei difetti è stato rilevato.

Prova 3



Figura 63. Sonda Set-Up 3.1 prova 3

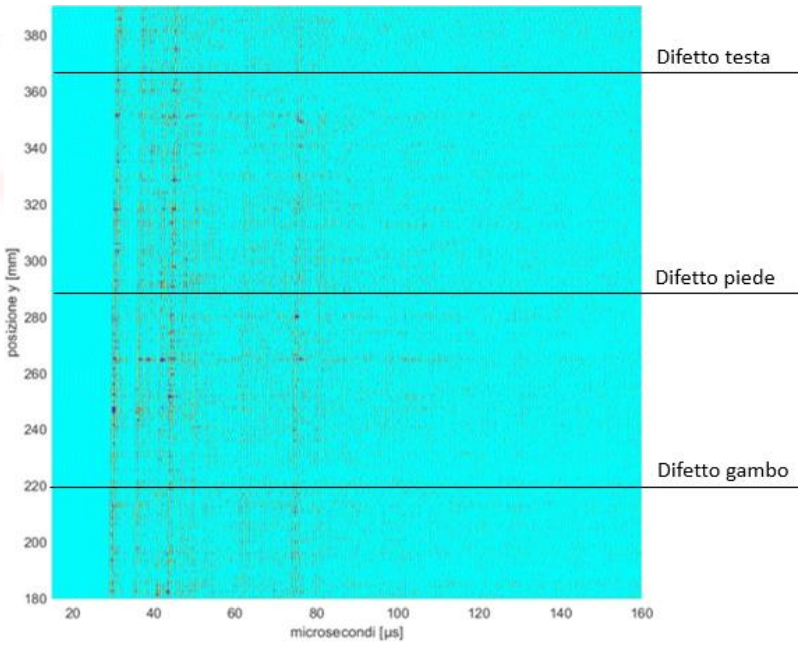


Figura 62. Set-up 3.1 Prova 3 B-Scan

ΔX'=4 mm

ΔZ'=20 mm

In questa terza prova lo spot laser è stato ulteriormente abbassato (ΔZ'=20 mm). Anche in questo caso la rilevazione dei difetti è stata assente.

5.3.3. Set-Up 3.2

Per queste seconde prove (4-5-6) il binario è stato ruotato di 180° lungo l'asse verticale al fine di testare una diversa configurazione per la rivelazione del difetto presente sulla testa del binario, in questo caso, infatti, il foro si trova dalla stessa parte della sonda come mostrato in figura 64.



Figura 64. Set-up 3 Prova 2 vista in sezione

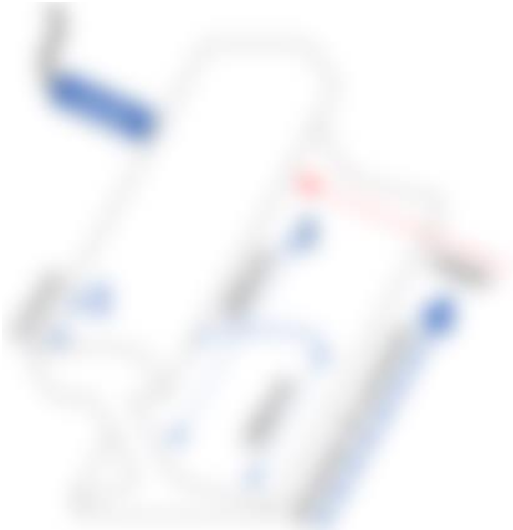


Figura 65. Set-up 3 Prova 2 vista prospettica

5.3.4. Risultati Set-up 3.2

Prova 4

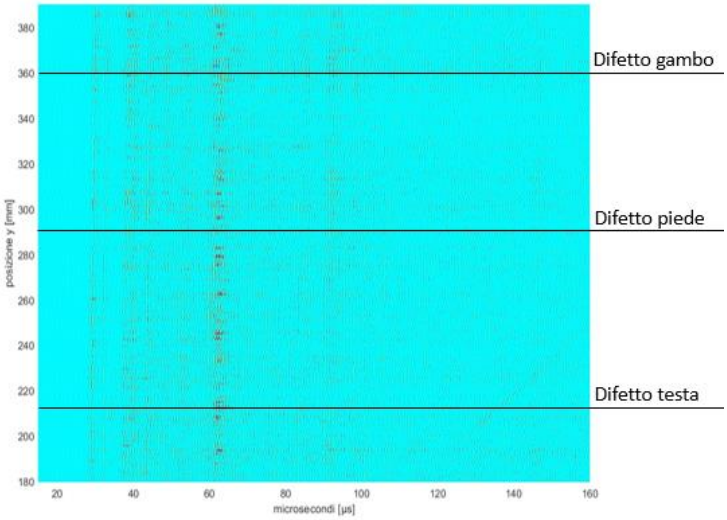


Figura 67. Set-up 3.2 Prova 4 B-Scan

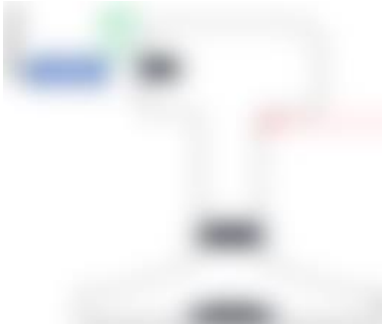


Figura 66. Sonda Set-Up 3.2 prova 4

ΔX'=4 mm

ΔZ'=0 mm

In questa quarta prova il laser è stato puntato alla base della testa del binario come nella configurazione uno del Set-Up 3.1. Anche qui non sono stati rilevati difetti.

Prova 5

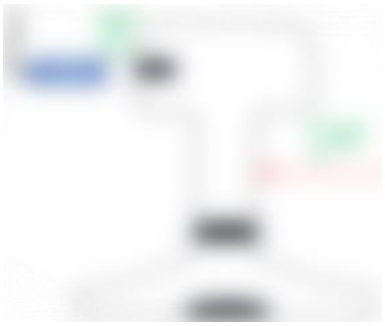


Figura 69. Sonda Set-Up 3.2 prova 5

ΔX'=4 mm

ΔZ'=10 mm

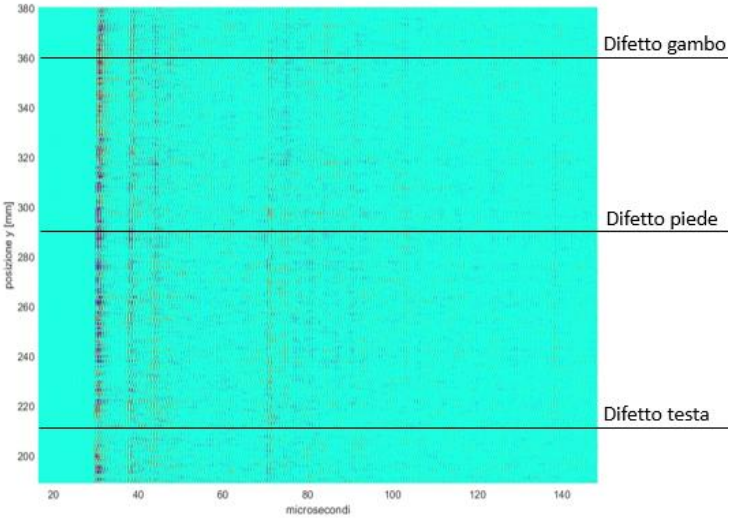
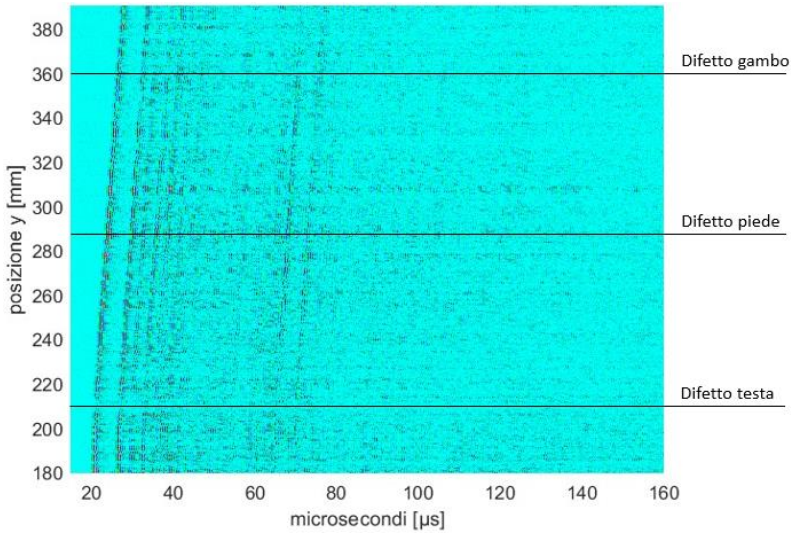


Figura 68. Set-up 3.2 Prova 5 B-Scan

Nella quinta prova lo spot laser è stato abbassato di 10 mm in analogia con la configurazione due del Set-Up 3.1. Dai risultati emerge una parziale rivelazione del difetto presente sulla testa del binario.

Prova 6



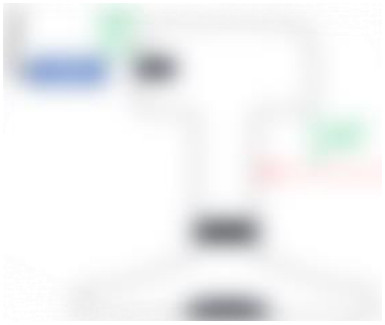


Figura 70. Sonda Set-Up 3.2 prova 6

ΔX'=4 mm

ΔZ'=0 mm

Figura 71. Set-up 3.2 Prova 6 B-Scan

Quest'ultima prova ha dimostrato una maggiore chiarezza nell'individuazione del difetto presente a lato della testa del binario, abbiamo infatti una chiara discontinuità nel segnale in arrivo alla sonda.

Possiamo inoltre notare un progressivo ritardo nell'arrivo del segnale al trasduttore all'avanzare della scansione, ciò è dovuto ad un allineamento non perfetto del binario sul

piano mobile del robot cartesiano, questo ha comportato l'allontanamento della sonda (fissa) dalla superficie del binario, allungando i tempi di volo delle onde.

In generale possiamo notare come anche in queste seconde prove (4-5-6) la visualizzazione dei difetti del piede e del gambo è stata completamente assente, d'altronde la rotazione del binario non ne ha modificato la posizione rispetto alla sonda, essendo questi simmetrici lungo la direzione direttrice del binario.

Conclusioni

L’obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di indagare e comprendere la capacità della tecnologia Laser Ultrasonic di rilevare difettosità interne a componenti metallici. in particolare, sono stati utilizzati degli spezzoni di binari ferroviari, visto il ruolo cruciale che il controllo e l’ispezione degli stessi ricopre al fine di garantire un fluido e sicuro funzionamento di tutta la linea ferroviaria. Sono stati considerati due diversi spezzoni di rotaia che presentavano difetti diversi, così da fornire a questa tecnologia un campo di prova sufficientemente variegato e capirne il potenziale di fronte a difetti più o meno complessi da rilevare.

Analizzando i risultati ottenuti è emerso che questa tecnologia si è dimostrata valida nella rilevazione di difetti superficiali che si trovavano in prossimità del cammino della sonda durante la scansione, la loro vicinanza ha infatti permesso una perturbazione del segnale sufficientemente grande da non poter essere coperta dalle altre onde ultrasonore propagatesi all’interno del binario. Per quanto riguarda la rilevazione di difetti lontani dalla superficie di ricezione della sonda i risultati sono stati più scadenti, sono emerse, infatti, alcune criticità alle quali sarà fondamentale prestare attenzione in sviluppi futuri di questa tecnologia.

In particolare, per i primi due set-up, essendo stata utilizzata un'unica superficie di generazione e di rilevazione delle onde (la testa del binario), si è reso necessario per ovvi motivi di ingombro scostare la posizione della sonda da quella del laser, andandoli a posizionare uno a fianco dell’altro, generando così una zona, lungo la direzione di scansione (valore ΔY), compresa tra i due, questo scostamento ha generato un’area di incertezza sia nell’interpretazione dei dati ottenuti sia nella previsione delle riflessioni interne al binario che in un caso come questo vanno considerate in un volume e non più in una sezione bidimensionale del binario come era stato negli studi precedenti. Di ciò ne abbiamo un possibile esempio nella prova numero 7 del secondo set-up, dove è possibile notare una leggera discontinuità del segnale in una posizione apparentemente libera di difetti ma dove invece andando a considerare la posizione della sonda relativa a quella coordinata dello spot laser essa risulta essere in corrispondenza del difetto presente sul piede. Secondo questa ipotesi la discontinuità dovrebbe essere stata generata da una riflessione che si sviluppa su tre dimensioni e che ne rende estremamente difficile la previsione. Risulta quindi

vantaggioso ridurre il più possibile il valore di ΔY al fine di minimizzare gli effetti della tridimensionalità della scansione. Tuttavia, una vicinanza eccessiva della sonda al laser comporta un'altra criticità, ovvero la parziale copertura del segnale di interesse da parte dell'onda diretta in aria come è possibile notare nella prima prova del set-up uno. Ciò definisce una distanza minima di 45mm al fine di non interferire con le onde che si propagano all'interno del binario e che potrebbero essere portatrici di informazioni importanti per la rilevazione dei difetti.

In conclusione, le prove effettuate hanno evidenziato i punti di forza della tecnologia Laser Ultrasonic e portato alla luce nuove criticità che prima non erano state prese in considerazione. Sarà fondamentale fare tesoro dei risultati ottenuti per portare avanti lo sviluppo di questa tecnologia.

Bibliografia

[1] G. Cassano, «I difetti dei binari,» Politecnoco di Milano, corso di laurea in ingegneria Civile, Milano, 2016

[2] B. Zuccarello – «Controlli non distruttivi». Progettazione meccanica con materiali non convenzionali

[3] Karl F. Graff, Wave Motion in Elatic Solids, General Publishing Company, 1975.

[4] LASER-ULTRASONICS: PRINCIPLES AND INDUSTRIAL APPLICATIONS Jean-Pierre Monchalin National Research Council of Canada

[5] Uwe Voelz, Marco Kircher, Sandro G. Koch, Marcel Krenkel «Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers for Applications in Nondestructive Testing» Fraunhofer IPMS, Dresden, Germany

[6] R. Frattari «Analisi e sviluppo di tecniche di misura non a contatto ad ultrasuoni per il rilevamento dei difetti nei binari ferroviari» Ancona, febbraio 2023 – a.a 2021/2022