



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di laurea magistrale in

Ingegneria Meccanica

Acquisizione ed analisi di segnali di un sistema laser-ultrasonics per la rilevazione di difettosità di componenti in acciaio

Data acquisition and signal analysis of a laser-ultrasonic system for the detection of defects in steel components

relatore:

prof. Gian Marco Revel

studente:

Daniele Candelaresi

correlatore:

ing. Giuseppe Pandarese

Ancona, ottobre 2022 – a.a 2021/2022

Indice

Prefazione	
1. Introduzione	1
2. Componenti e metodi di ispezione non distruttiva	5
2.1 Vincoli di progetto	5
2.1.1 Campioni da ispezionare.....	5
2.1.2 Requisiti del sistema di ispezione.....	7
2.2 Metodologie non distruttive per l'ispezione di componenti in acciaio ..	8
2.3 Sistemi a ultrasuoni senza contatto per la diagnostica industriale	10
2.3.1 Propagazione degli ultrasuoni nei componenti da ispezionare.....	10
2.3.2 Trasduttore piezoelettrico.....	15
2.3.3 Trasduttore elettromagnetico.....	15
2.3.4 Trasduttore elettrocapacitivo	16
2.3.5 Microfono ottico	17
2.3.6 Generazione e rilevamento degli ultrasuoni mediante laser	18
3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato	25
3.1 Generazione di ultrasuoni mediante impulsi laser e rilevamento con sonda piezoelettrica senza contatto	25
3.2 Setup sperimentale utilizzato.....	27
3.2.1 Laser Continuum NY60-10	27
3.2.2 Sistema di movimentazione Hirata	30
3.2.3 The Ultrason Group NCT210	30
3.2.4 JSR ultrasonics DPR300	31
3.2.5 PC controllo acquisizione.....	31
3.3 Tabella parametri di acquisizione	35
4. Analisi del segnale	37

4.1	Filtraggio delle waveform.....	37
4.2	C-scan	43
4.2.1	Parte integra	44
4.2.2	Valore RMS ² in intervallo di tempo costante	45
4.2.3	Tempo di arrivo (ToA).....	51
4.2.4	Massimi dell'involuppo (envP).....	57
4.2.5	Confronto C-scan.....	62
5.	Conclusioni e sviluppi futuri	65
	Bibliografia.....	69

Prefazione

Questo lavoro di tesi nasce per sviluppare un sistema di diagnostica industriale automatico e non distruttivo, basato su tecnologia laser-ultrasonics, per l'ispezione di strutture in acciaio. La realizzazione di un tale sistema offrirebbe dei vantaggi. Grazie all'impiego di laser non vi è contatto con la struttura e il sistema di ispezione può essere reso mobile con la capacità di eseguire scansioni in situ e trasmettere i dati da remoto. Viene meno quindi la necessità di smontare parti della struttura per trasportarle in un centro di ispezione o comunque attraverso sopraluoghi di addetti al controllo, garantendo così una riduzione dei costi operativi. Inoltre, attraverso gli ultrasuoni è possibile rilevare anche la presenza di difetti interni alla struttura e la tecnica si presta bene all'automazione, garantendo così una interpretazione dei segnali più affidabile di quella a carico dell'operatore addetto al controllo. Il progetto qui descritto si articola in quattro capitoli: nel primo viene illustrato lo stato dell'arte delle ispezioni ndt in componenti in acciaio; nel secondo vengono presi in esame i campioni ispezionati in laboratorio e viene illustrato il principio di funzionamento delle tecnologie disponibili per l'ispezione introducendo tecniche laser-ultrasonics; nel terzo viene motivata la scelta di sviluppare un sistema diagnostico basato su tecnologia laser-ultrasonics e si mostra il setup del sistema utilizzato; nel quarto si mostrano gli algoritmi sviluppati per il processamento dei dati acquisiti con i risultati delle scansioni.

Le attività di sperimentazione sono state effettuate presso il laboratorio FAND lab del dipartimento DIISM dell'Università Politecnica delle Marche.

Settembre 2022

Daniele Candelaresi

1. Introduzione

I controlli non distruttivi (ndt) trovano impiego perché permettono di valutare la qualità di una struttura senza produrre qualsiasi cambiamento significativo della stessa fondamentale per sorvegliare l'integrità nel corso della vita in esercizio, o nel caso di controllo qualità a fine linea produttiva, evitando di dover compromettere una popolazione statistica del lotto, composta per lo più da componenti che rispettano le specifiche dati i sempre più alti livelli di qualità raggiunti dai moderni processi di fabbricazione.

I difetti nel componente possono presentarsi a valle del processo di fabbricazione (es° soffiature nei getti da fonderia) oppure insorgere per via dei carichi nella fase di esercizio. Per quanto riguarda i componenti in acciaio si possono distinguere difettosità di natura metallurgica (es° presenza di strutture dendritiche troppo grossolane) oppure difettosità di tipo geometrico, tipicamente più ampie e localizzate [1]. Per il rilevamento di quest'ultime, nelle ispezioni di componenti in acciaio, esistono svariate tecniche non distruttive. La più antica e semplice oltre l'ispezione visuale, è basata sull'utilizzo di liquidi penetranti. È utilizzata principalmente per il controllo di cricche superficiali in ruote dentate, saldature o alberi [1] [2] [3] ma la spinta all'automazione industriale e i rischi per l'operatore connessi all'applicazione del solvente rendono la tecnica poco attrattiva e funzionale. Difettosità superficiali e sub-superficiali possono essere evidenziate attraverso magnetoscopia o test con correnti parassite. Nel primo caso si hanno l'ispezione di funivie, carri ponte e strutture filiformi [4] [5] mentre nel secondo si hanno applicazioni nel controllo di tubazioni metalliche e serbatoi [6]. Per difettosità interne come cavità queste tecniche non sono idonee e vengono invece adottati test basati su ultrasuoni o radiografie. Quest'ultime hanno massima versatilità sul tipo di materiale e permettono di ispezionare senza contatto tubi, saldature, componenti automobilistici o di verificare che un componente nascosto sia stato assemblato [5] [7]. I principali svantaggi dati dall'impiego di raggi X sono il maggior costo legato alla strumentazione, il rischio di radiazioni ionizzanti e la accessibilità sulla parte che richiede sempre almeno due superfici opposte [5].

Inoltre, la parte sotto ispezione dovendo venire schermata non potrà essere troppo estesa. Proprio questi aspetti invece rendono tecniche basate su ultrasuoni più diffuse,

1. Introduzione

conservando anche una discreta versatilità sul tipo di materiali ispezionabili, principalmente ceramiche, polimeri e metalli [8]. La costruzione di un sistema automatico di ispezione con ultrasuoni è in parte resa possibile dalla esistenza di sonde ultrasonore senza contatto di tipo piezoelettrico, elettromagnetico o elettrocapacitivo usate sia per generare il segnale sia in ricezione [1] [5] [8] [9]. Queste sonde trasducono il livello di pressione ultrasonora in voltaggio e il loro limite risiede nel fatto che, non potendo disporre un mezzo accoppiante, devono essere localizzate tanto più vicino al componente sotto ispezione tanto più è elevato il salto di impedenza acustica tra il materiale del campione sotto ispezione e l'aria. Infatti, in una configurazione sorgente-campione-ricevente il flusso ultrasonoro incontra due volte l'interfaccia con il mezzo riflettendo quindi una cospicua frazione dell'energia immessa dalla sorgente dato che l'acciaio presenta una impedenza acustica 5 ordini di grandezza maggiore di quella dell'aria. Se da un lato la sonda deve essere a distanza ravvicinata dalla superficie da cui propagare il fascio ultrasonoro e con inclinazione opportuna dall'altro il "ringing", dalla durata di μs , causa un mascheramento della risposta superficiale se la distanza è troppo breve [10].

Questi limiti possono essere superati con tecniche laser-ultrasonics: un impulso laser, di opportuna lunghezza d'onda, frequenza di ripetizione e potenza superficiale, incide la superficie del campione generando nello stesso un'onda ultrasonora [11] [12]. È stato osservato che nei materiali metallici le onde ultrasonore innescate sono rilevabili anche a fronte di potenze del laser sufficienti da non danneggiare la superficie [11], rendendo questa tecnica disponibile come controllo non distruttivo, applicabile ad esempio nelle ispezioni di assili ferroviari [13] o in applicazioni di caratterizzazione vibrazionale di strutture [14].

Per eliminare la seconda interfaccia campione-aria è possibile usare sistemi laser anche in ricezione con elevata sensibilità [11]. Questo permette di avere una distanza dal campione molto superiore mantenendo una elevata risoluzione spaziale, tale da permettere il rilevamento di spigoli nelle ali di aeromobili o lo spessore di rivestimenti [15]. I principali svantaggi di usare mezzi ottici per il rilevamento di onde ultrasonore risiedono nella dipendenza dalla finitura superficiale del campione [16], nel costo dei sistemi ottici per le stringenti condizioni di monocromaticità e coerenza e nella non linearità del sistema che rende inadeguata ogni operazione di filtraggio del rumore in bassa frequenza nell'elaborazione numerica del segnale [11]. Esistono strumenti

1. Introduzione

compensati per filtrare analogicamente le vibrazioni a bassa frequenza ma rappresentano una complessità importante nella strumentazione del sistema [14]. La soluzione che è stata qui adottata, anche motivata da un requisito di mobilità del sistema diagnostico, è quella di usare un laser Nd:YAG per la generazione del segnale ultrasonoro e una sonda piezoelettrica senza contatto in ricezione, sistema certamente più economico, che mantiene linearità e che restituisce scansioni con sufficiente risoluzione e sensibilità se confrontata con un interferometro laser [17].

L'acquisizione dati è stata di tipo punto-punto, muovendo il campione su una guida cartesiana scansionando la superficie superiore a ≈ 2 mm di distanza.

Ogni acquisizione utile è una waveform caratterizzata da un treno di wavepacket a cui è sovrapposto rumore gaussiano. Ciascun wavepacket rappresenta l'arrivo del segnale di risposta del materiale all'impulso laser sulla superficie sensibile del trasduttore; quindi, i primi sono legati a onde trasmesse direttamente mentre i successivi a onde che sono state riflesse, con percorso maggiore. Per la fase di analisi del segnale risultati da evidenziare in letteratura sono stati ottenuti con l'applicazione di filtri adattati (North filters) [18] o usando algoritmi SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) [15] sui segnali acquisiti, stabilendo in ogni caso se in punto c'è o no una difettosità.

Questi algoritmi sono stati testati su campioni di riferimento per banche prove a ultrasuoni, o per evidenziare difetti prossimi alla superficie in componenti metallici. Non sono state riportate applicazioni per il rilevamento di eventuali difettosità interne al materiale o vicino a spigoli lontani dal punto di misura, caso dei campioni ispezionati in questo lavoro. Per osservare tutte le difettosità si è optato di realizzare grafici C-scan basati su metriche più semplici, tratte da indicatori frequentemente utilizzati nella diagnostica industriale: valore quadratico medio in un intervallo di tempo definito (RMS^2), tempo di arrivo dell'onda diretta (ToA) e picchi di ampiezza nell'involuppo della waveform (envP). Per valutare quanto le difettosità sono rilevabili si calcolano le rispettive metriche di contrasto (RMS^2c , ToAc, envPc), che rapportano i valori con quelli ottenuti su una sezione integra media di riferimento. Inoltre, se attraverso il ToA si possono evidenziare solo le difettosità interagenti con onde dirette, con gli altri indicatori si possono confrontare anche i relativi valori nei diversi istanti di tempo, con la possibilità di identificare difettosità interne o lontane dal punto di acquisizione, la cui presenza può essere rilevata tramite le onde riflesse.

2. Componenti e metodi di ispezione non distruttiva

In questo capitolo vengono illustrate le tecniche di diagnostica industriale non distruttive disponibili sulla base delle difettosità che si vogliono rilevare nei campioni e dei vincoli sul sistema da sviluppare. Viene poi introdotto il principio di funzionamento dei sistemi laser-ultrasonics e i relativi vantaggi e svantaggi.

2.1 Vincoli di progetto

Si inizia con il descrivere i vincoli di progetto imposti sul sistema diagnostico che si vorrebbe ottenere.

2.1.1 Campioni da ispezionare

I componenti da ispezionare sono in acciaio ad alto contenuto carbonio ($C > 0.6\%$) largamente utilizzato nella costruzione di chassis, travi elettrosaldate, utensili da taglio e parti di infrastrutture civili ^[19] ^[20].

Per le sue caratteristiche meccaniche, l'acciaio al carbonio è tra i materiali più adatti per eseguire con facilità le saldature, tuttavia risulta essere soggetto a corrosione: senza il trattamento adeguato arrugginisce in presenza di acqua o di aria.

L'elevato tenore di carbonio rende agevole lo sviluppo di cricche in prossimità di fori, intagli, saldature o distaccamenti di materiale da frattura.

I difetti esaminati, di tipo geometrico, sono realizzati con smerigliatrice con disco diamantato su un componente a forma di trave retta a sezione costante, con un asse di simmetria. La loro geometria è presentata in Tab. 1.

Sono stati forniti due campioni dello stesso componente (uno di lunghezza 605 mm e l'altro di lunghezza 280 mm) con difettosità distinte in modo che queste fossero sufficientemente distanti una dall'altra e che si evitasse di portare un unico componente con tutte le difettosità in quanto molto pesante (i campioni hanno una massa di ≈ 36 kg e ≈ 17 kg misurando il volume dal modello CAD e usando la densità dell'acciaio al carbonio in Tab. 3). Le difettosità realizzate artificialmente simulano condizioni del componente che possono preesistere alla messa in servizio del materiale, derivanti dal processo di fabbricazione o essere conseguenza dell'esercizio.

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

L605 difetto gambo		
L605 difetto testa		
L605 difetto piede		
L280 difetto testa		
L280 difetto piede		

Tab. 1: le specifiche dimensionali dei difetti apportati sui componenti sono espresse in mm.

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

2.1.2 Requisiti del sistema di ispezione

Il sistema diagnostico deve avere i seguenti requisiti tecnici per l'applicazione:

- automatico: il sistema deve poter trasmettere i dati ed eseguire il controllo in modalità robotizzata;
- mobile con traiettoria parallela all'asse mediano del componente *: il sistema deve poter alloggiare su un carrello che scansiona la struttura traslando parallelamente all'asse mediano della trave; quindi, si devono prevedere superfici di ingresso e uscita del pezzo (Fig. 1);
- senza contatto: si evita l'usura e il danneggiamento dei trasduttori;
- con metodo non distruttivo: si richiede che il mezzo fisico con cui si indaga sull'integrità del componente non ne alteri irreversibilmente lo stato [1];
- senza preparazione della superficie da scansionare: per motivi di costo e legati alla automazione si vuole evitare di introdurre dei materiali consumabili;
- con accesso alle superfici del componente in esame come mostrato in Fig. 1: indipendentemente dalla tecnica diagnostica utilizzata non è possibile installare trasduttori o usare punti di ingresso del segnale su una superficie vincolata a terra o con un altro componente in quanto si vuole la possibilità di eseguire controlli sul componente senza smontarlo.

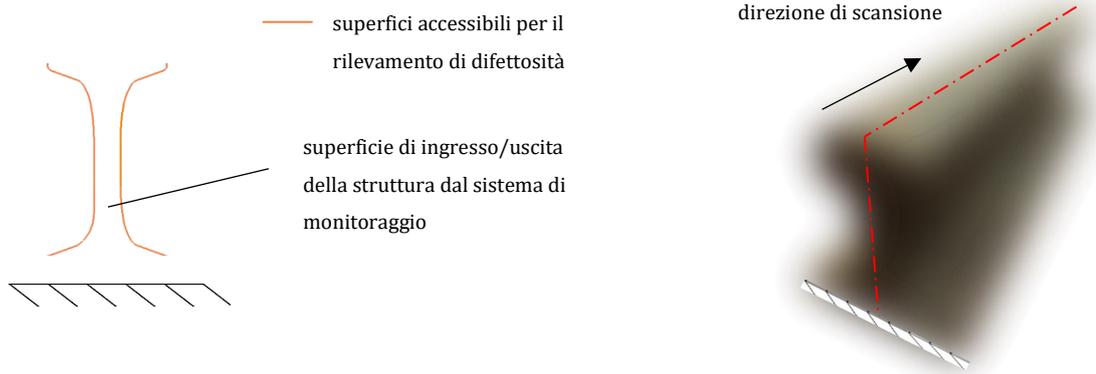
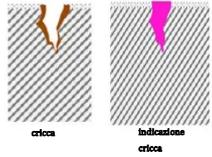
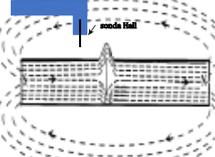
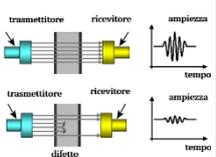
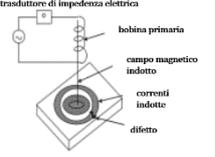
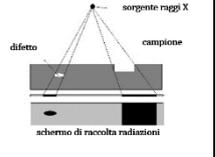


Fig. 1: specifiche di accessibilità del sistema diagnostico sul campione da esaminare

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

2.2 Metodologie non distruttive per l'ispezione di componenti in acciaio

Le tecniche diagnostiche non distruttive disponibili per il controllo d'integrità su parti in acciaio, materiale di interesse sono riportate in Tab. 2 nella quale sono messi a confronto i principi di funzionamento, i componenti comunemente ispezionati, il tipo di difettosità rilevabili e la compatibilità con i requisiti elencati al paragrafo 2.1.2.

	liquidi penetranti	magnetoscopia	ultrasuoni	correnti parassite	radiografia
principio di funzionamento	 <p>Si usa una soluzione capace di penetrare per capillarità dentro le discontinuità emerse in superficie. Una volta rimosso il liquido in eccesso dalla superficie, la frazione introdottasi nelle discontinuità si mette in evidenza con l'aiuto di un agente assorbente. Si ottiene così una indicazione visibile, sotto luce di Wood o luce naturale, dei difetti superficiali a seconda del tipo di liquido impiegato.</p>	 <p>È basata sulla dispersione delle linee di campo magnetico del campione magnetizzato: queste si addensano dove trovano un materiale più permeabile e viceversa tendono ad allargarsi, interessando sezioni più ampie, dove esso lo è di meno. Attraverso un trasduttore di intensità di campo magnetico come una sonda Hall o con l'ausilio di polveri magnetiche vengono rivelate le discontinuità nel materiale.</p>	 <p>Si immette nel componente un flusso ultrasonoro generato da un'apposita sorgente che viene riflesso dalle discontinuità presenti per via di un salto di impedenza acustica. È quindi possibile utilizzare l'informazione di abbattimento del livello di pressione sonora e la sua localizzazione nel tempo per rilevare posizione e dimensione di disomogeneità nel materiale.</p>	 <p>Vengono utilizzate delle correnti indotte (dette parassite) nel materiale conduttore da esaminare generate da un campo magnetico sorgente primario alternato. A loro volta queste correnti indotte creano un campo magnetico secondario che interagendo con il primario stabiliscono il valore di induttanza della bobina sorgente; quando incontrano una difettosità il valore dell'induttanza varia.</p>	 <p>Si provvede a rilevare su pellicola o su altri dispositivi le variazioni di attenuazione che subisce un fascio di raggi X a spettro continuo in funzione degli spessori attraversati, interagendo coi particolari esaminati. Le eventuali disomogeneità presenti nei materiali sono così evidenziate sulla pellicola radiografica come zone annerite in modo differente.</p>

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

	liquidi penetranti	magnetoscopia	ultrasuoni	correnti parassite	radiografia
<i>componenti tipici</i>	<ul style="list-style-type: none"> • pistoni • bielle • valvole • ruote dentate • piastre • travi • cuscinetti • alberi • saldature 	<ul style="list-style-type: none"> • pistoni • bulloni • cuscinetti • barre • tubi • funi • molle • alberi 	<ul style="list-style-type: none"> • alberi • travi • cuscinetti • ruote • pneumatici • saldature • piastre 	<ul style="list-style-type: none"> • travi • piastre • tubi • serbatoi 	<ul style="list-style-type: none"> • pistoni • getti da fonderia • piastre • tubi • serbatoi
<i>tipo difetti</i>	difetti superficiali (non danno indicazione della profondità)	difetti superficiali e sub-superficiali di materiali ferromagnetici	difetti superficiali e interni	difetti superficiali e sub-superficiali su superfici con buona finitura	difetti superficiali e interni
<i>preparazione del campione</i>	si: il campione deve essere pulito e cosparso di liquido penetrante	si: il campione deve essere magnetizzato e successivamente smagnetizzato	no	no	no
<i>possibilità di scansione automatica</i>	non esistono soluzioni commerciali	si	si	si	si
<i>accessibilità</i>	sulla superficie di interesse	sulla superficie laterale chiusa per introdurre la magnetizzazione	in prossimità della superficie di interesse	in prossimità della superficie di interesse	in prossimità della superficie di interesse e superficie opposta
<i>possibilità senza contatto</i>	no	si	si	si	si

Tab. 2: metodi non distruttivi standard per l'ispezione di componenti in acciaio ^[1] ^[3] ^[21]

Alcune di queste tecniche descritte per le parti in acciaio trovano applicazione anche per altri materiali: è il caso dei liquidi penetranti, degli ultrasuoni o della radiografia. Dalla tabella si evince che in base ai vincoli di progetto la fisica con cui ispezionare il componente dovrebbe basarsi sugli ultrasuoni.

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

Infatti, se si considerano i difetti presentati in Tab. 1 la difettosità “L605 difetto gambo” apparirebbe in ogni caso interna nell’impiego di liquidi penetranti (2.1.2), e non può essere rispettato neanche il vincolo sulla preparazione della superficie. La magnetoscopia richiede una accessibilità su tutta la superficie laterale del componente, aspetto non realizzabile a causa del vincolo al terreno o ad un'altra struttura. La tecnica radiografica non appare perseguibile per almeno due motivi: in primo luogo, lavorando in trasmissione, le superfici di accesso descritte in Fig. 1 non consentono di rilevare i difetti alla base poiché lo schermo di raccolta delle radiazioni dovrebbe estendersi in prossimità della superficie vincolata; in secondo luogo, la portabilità in sito di questo tipo di ispezione è limitata dal rischio di possibili fuoriuscite di radiazioni ionizzanti. Il principale limite di applicabilità nell’utilizzo di correnti indotte risiede nella loro capacità di diagnosticare solo difettosità in corrispondenza della sonda e di tipo superficiale, invece i campioni simulano difettosità che appaiono sparse, lungo più punti della superficie. La tecnica a ultrasuoni è più versatile nel posizionamento degli strumenti consentendo anche una configurazione in trasmissione, dove generatore e ricevitore restano separati, con possibilità di rilevare difettosità interne al materiale. Il vantaggio dell’uso di ultrasuoni è anche da ricondursi nella possibilità di generare il segnale di ingresso in più direzioni attraverso un laser. In questo modo si supera il limite di avere un fascio direzionato che in geometrie complesse come nei campioni presentati non potrebbe intercettare tutte le difettosità presenti.

2.3 Sistemi a ultrasuoni senza contatto per la diagnostica industriale

2.3.1 Propagazione degli ultrasuoni nei componenti da ispezionare

Quando si parla di ultrasuoni si tratta di onde elastiche (si propagano in un mezzo materiale) con banda di frequenze superiore a 20 kHz.

Nei campioni metallici presentati si possono presentare tre tipologie di onde ultrasonore, classificate in base al moto delle particelle rispetto alla direzione d’onda:

- onde longitudinali o di compressione (L);
- onde trasversali o di taglio (T);
- onde superficiali o di Rayleigh (S);

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

La frequenza di queste onde è legata alla lunghezza d'onda λ_L secondo la relazione scritta per le onde L :

$$\lambda_L = \frac{v_L}{f} \quad (2.1)$$

con v_L velocità di propagazione delle onde longitudinali e f componente armonica dell'onda ultrasonora. Questo permette di rilevare difettosità di dimensione $> \lambda_L$.

Le sollecitazioni associate a tali onde elastiche nel materiale sono sempre di molto inferiori al suo limite elastico e vengono descritte attraverso modelli lineari.

Il campo delle frequenze di interesse per le applicazioni delle prove non distruttive è all'incirca compreso fra 100 kHz e 20 MHz.

Di seguito si riportano le proprietà acustiche per alcune leghe e classi di acciaio:

lega Fe-C	densità	velocità di propagazione onde L	velocità di propagazione onde T	velocità di propagazione onde S	impedenza acustica
	ρ $\times 10^3$ [kg/m ³]	v_L [mm/ μ s]	v_T [mm/ μ s]	$v_S \approx 0.98 v_T$ [mm/ μ s]	$Z = \rho \cdot v_L$ $\times 10^7$ [kg/(m ² · s)]
AISI 1020	7.9	5.89	3.25	3.19	4.54
AISI 4340	7.9	5.84	3.25	3.19	4.56
acciai al carbonio *	7.8	5.85	3.23	3.17	4.56
acciai inox serie 300 *	8.0	5.68	3.09	3.03	4.50
acciai inox serie 400 *	8.0	5.70	3.18	3.12	4.38

Tab. 3: grandezze acustiche di alcune leghe; * proprietà medie della lega. Non sono disponibili incertezze di misura sui valori riportati. ^[1]^[22]

Dato l'elevato tenore di carbonio nella lega dei componenti sono stati considerati come valori di velocità di propagazione degli ultrasuoni quelli della voce "acciai al carbonio". Un'altra caratteristica fondamentale degli acciai è che in genere i campioni possono essere considerati mezzi non dispersivi sia per le caratteristiche omogenee ed isotrope del materiale, sia perché i ricevitori e/o generatori lavorano su uno spettro di frequenze relativamente ridotto e dunque la differenza di velocità al variare della frequenza è trascurabile nella maggior parte delle applicazioni ^[1]. Dunque, le velocità di propagazione date in Tab. 3 possono essere ritenute indipendenti dalla frequenza del fascio ultrasonoro generato, fatto che semplifica l'analisi del segnale successiva.

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

In presenza di interfacce tra mezzi diversi (vedi Fig. 2), rispetto all'onda incidente variano:

- il livello di pressione sonora trasmessa;
- la direzione di propagazione dell'onda trasmessa.

Inoltre avviene anche una conversione di modo di vibrazione così che una singola onda incidente di tipo L o T viene riflessa in due componenti di tipo L e T oppure qualora

venga superato un angolo critico $\theta_c = \arcsin\left(\frac{v_T}{v_L}\right) \approx 33.5^\circ$ si sviluppano un'onda S e

un'onda T .

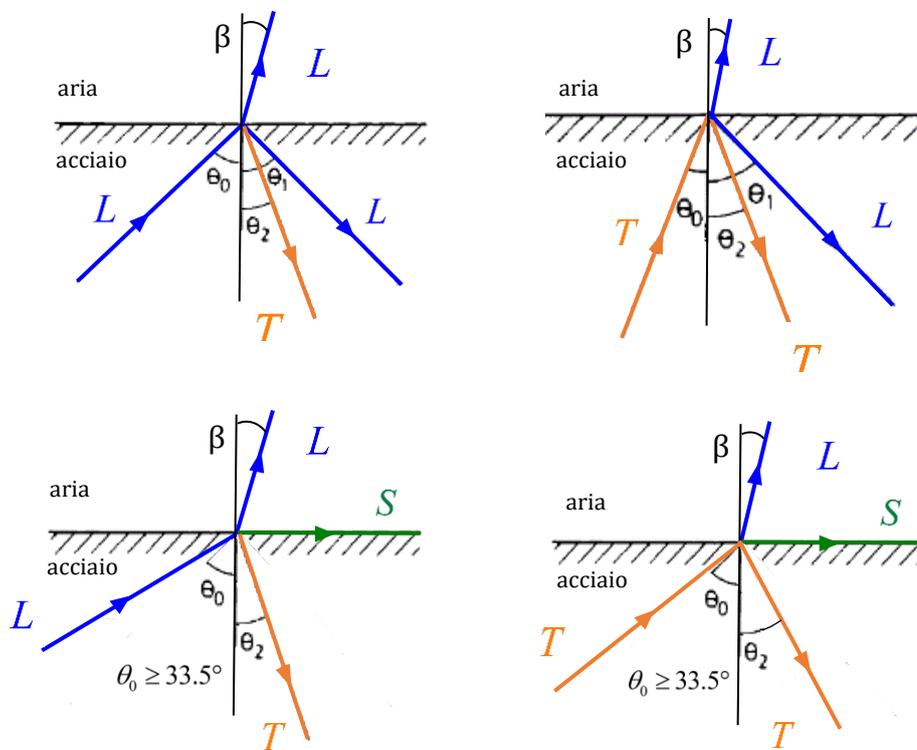


Fig. 2: conversione di modo e trasmissione di onde ultrasonore da un mezzo in acciaio al bordo del campione; la scala angolare nell'immagine non è proporzionale agli angoli effettivi.

La peculiarità delle onde S che si sviluppano è quella di seguire nella loro propagazione la forma del campione a differenza delle onde L e T che possono propagarsi in linea retta e questo aspetto può essere usato per diagnosticare difetti superficiali non prossimi al trasduttore. Poiché non si disperdono nel volume queste onde possono propagarsi con attenuazione minore e vengono riflesse da ostacoli

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

superficiali ^[1]. In aria la componente rifratta può essere solo di tipo longitudinale (non supportando sforzi di taglio) e ha velocità di propagazione, a 20°C e pressione atmosferica, stimabile con $v_0 \approx 340 \text{ m/s} = 0.34 \text{ mm}/\mu\text{s}$.

Le relazioni che legano le direzioni di propagazione delle onde incidenti con le onde rifratte e riflesse sono di tipo Snell:

$$\text{onda incidente } L, \theta_0 < 33.5^\circ : \theta_1 = \theta_0 \quad (2.2)$$

$$\text{onda incidente } L, \theta_0 < 33.5^\circ : \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_0} = \frac{v_T}{v_L} \quad (2.3)$$

$$\text{onda incidente } L, \theta_0 < 33.5^\circ : \frac{\sin \beta}{\sin \theta_0} = \frac{v_0}{v_L} \quad (2.4)$$

$$\text{onda incidente } T, \theta_0 < 33.5^\circ : \theta_2 = \theta_0 \quad (2.5)$$

$$\text{onda incidente } T, \theta_0 < 33.5^\circ : \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_0} = \frac{v_L}{v_T} \quad (2.6)$$

$$\text{onda incidente } T, \theta_0 < 33.5^\circ : \frac{\sin \beta}{\sin \theta_0} = \frac{v_0}{v_T} \quad (2.7)$$

Le relazioni (2.2)-(2.7) sono valide quando la lunghezza d'onda dell'ultrasuono incidente è molto minore delle dimensioni dell'interfaccia altrimenti si innescano fenomeni di diffrazione più complessi nella modellizzazione, che permettono al fascio ultrasonoro di aggirare la discontinuità come una difettosità interna.

Dalla (2.7) si evince che quando un'onda acustica proveniente dall'acciaio incontra un mezzo a velocità di propagazione più lenta come l'aria, l'onda rifratta si tramette con un angolo β limitato. Nel caso dell'acciaio-aria $\frac{v_0}{v_T} \approx 0.1$ quindi la propagazione

dell'onda rifratta è pressoché ortogonale alla superficie anche per valori θ_0 inferiori all'angolo retto.

L'aria ha una impedenza acustica pari a circa $415 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ mentre l'acciaio di interesse 5 ordini di grandezza in più.

I coefficienti di riflessione r_L e τ_L , che definiscono la frazione di intensità di pressione sonora riflessa e trasmessa dell'onda L perpendicolare incidente a un interfaccia piana tra due mezzi diversi, sono dati dalle equazioni sottostanti dove Z_1 e Z_2 sono le impedenze acustiche del mezzo in cui proviene l'onda e il mezzo in cui essa si trasmette.

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

$$r_L(\theta_0 = 0^\circ) = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.8)$$

$$\tau_L(\theta_0 = 0^\circ) = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.9)$$

Inserendo i valori dell'acciaio al carbonio e dell'aria si ottiene $\tau_L \simeq 10^{-5}$ quindi viene segnalata l'elevata frazione di energia acustica che rimane confinata nel primo mezzo presa un'onda incidente perpendicolare alla superficie di interfaccia.

Le formule (2.8)-(2.9) valgono quando $\theta_0 = 0^\circ$ ovvero in caso di massima riflessione, altrimenti c'è una dipendenza angolare dei coefficienti r_L e τ_L [11].

Ovviamente le onde incidenti, rifratte e riflesse subiscono anche una attenuazione nel mezzo lungo la direzione di propagazione con l'andamento seguente:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \quad (2.10)$$

con P_0 , P ampiezze dell'onda di pressione e α coefficiente di assorbimento acustico.

α dipende dalla frequenza dell'onda acustica ed è monotono con la frequenza, quindi minore sarà la lunghezza d'onda acustica e maggiore sarà l'attenuazione da parte del mezzo. Nei materiali metallici un altro fattore che influenza il coefficiente di assorbimento acustico è dato dalla dimensione del grano: tipicamente la dimensione di quest'ultimo è più piccola della lunghezza d'onda ultrasonora e quindi fintanto che questa condizione è rispettata all'aumentare delle dimensioni dei bordi di grano aumenta anche α .

In aria a 1MHz $\alpha \simeq 1.2 \text{ cm}^{-1}$ [23], un valore alto se confrontato con quello medio dell'acciaio $\alpha \simeq 0.01 \text{ cm}^{-1}$ alla stessa frequenza [24].

Un sistema di diagnostica a ultrasuoni prevede almeno tre strumenti fondamentali: un generatore del fascio ultrasonoro, un ricevitore che trasduce la vibrazione ultrasonora e un sistema di acquisizione. Qualora il principio di funzionamento del sistema fosse di tipo acustico ci può essere un eventuale mezzo di accoppiamento tra ricevitore e campione e/o generatore e campione che serve come adattatore di impedenza acustica. Tuttavia il sistema di interesse non deve essere a contatto con il componente quindi l'accoppiante non può essere inserito. Per rilevare/generare ultrasuoni senza contatto

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

con il campione esistono diversi trasduttori e sistemi più complessi. Si riportano di seguito le tipologie più diffuse nel mercato e tra gli apparati sperimentali.

2.3.2 Trasduttore piezoelettrico

Una generica sonda ultrasonora che sfrutta il principio piezoelettrico deve avere tra i suoi componenti, il blocco costituito dall'elemento attivo, ovvero il materiale piezoelettrico e gli elettrodi fondamentali per innescare la trasduzione del segnale elettrico applicato in spostamento della superficie attiva se usato come generatore del fascio ultrasonoro o viceversa nel caso di ricevitore.

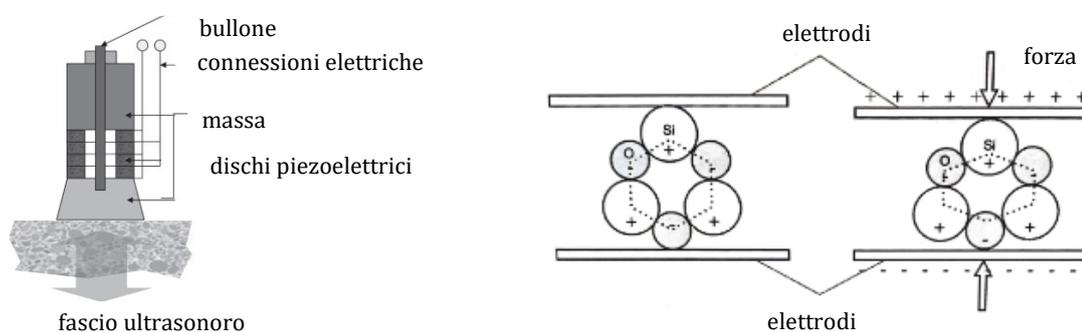


Fig. 3: tipica struttura di una sonda piezoelettrica per ultrasuoni in quarzo (SiO_2) [33] [34]

L'ampiezza della pressione data dall'oscillazione è lineare con la tensione applicata nell'applicazione. Il generatore/rilevatore essendo un sistema del 2° ordine presenta una banda di risonanza che viene utilizzata per incrementare il guadagno del trasduttore, altrimenti insufficiente. Quindi la risposta in frequenza di questo sistema non è lineare.

2.3.3 Trasduttore elettromagnetico

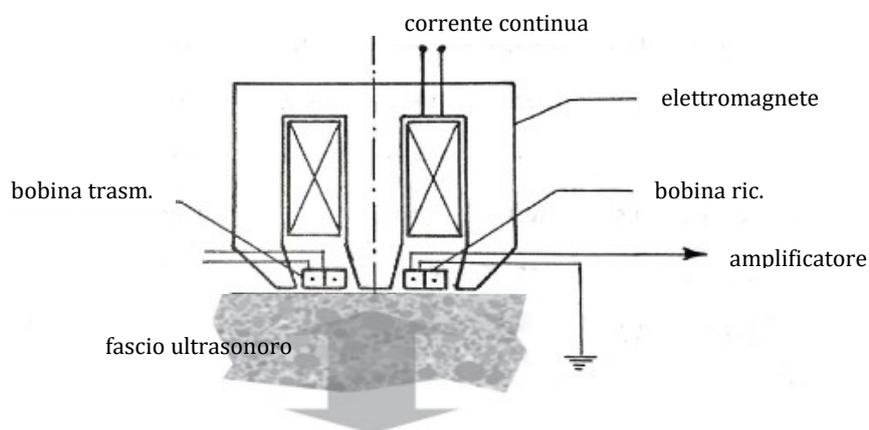


Fig. 4: schema di una sonda per ultrasuoni di tipo elettromagnetico

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

La generazione del fascio ultrasonoro in questo sistema è basata sull'interazione tra un campo magnetico costante e le correnti ad alta frequenza indotte nello strato superficiale di un materiale conduttore da una bobina in prossimità di esso.

In queste condizioni, nello strato superficiale di materiale, si producono forze di Lorentz alternate e quindi vibrazioni ultrasonore alla frequenza delle correnti indotte. Inversamente, onde ultrasonore che vengono trasmesse dal pezzo in esame, in presenza di campo magnetico, generano forze elettromagnetiche che sono rilevabili con una bobina.

Il vantaggio di questo trasduttore rispetto ai precedenti è che sposta la generazione del fascio ultrasonoro direttamente nel campione tramite onde elettromagnetiche e non direttamente acustiche, evitando quindi l'uso di un adattatore di impedenza acustica. Tuttavia questo trasduttore non è adatto se la superficie è ossidata, come nel caso dei campioni presentati, in quanto poco conduttiva.

2.3.4 Trasduttore elettrocapacitivo

I trasduttori elettrocapacitivi sono dispositivi che possono essere utilizzati sia per la generazione che per la ricezione del fascio ultrasonoro. Questi dispositivi trasducono in voltaggio la vibrazione ultrasonora percepita da una membrana di un condensatore grazie a una variazione di capacità elettrica. In Fig. 5 si può vedere uno schema funzionale:

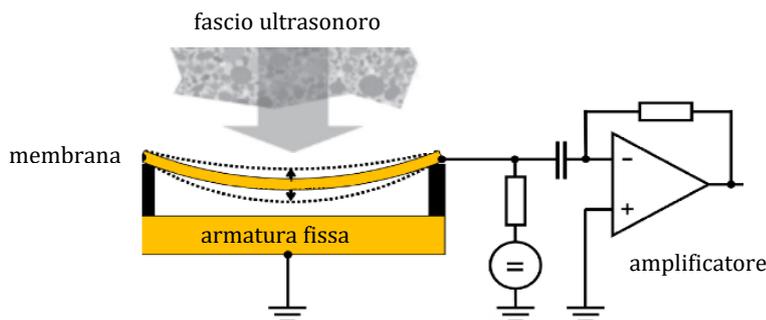


Fig. 5: schema di un trasduttore elettrocapacitivo in modalità ricezione

Una sonda elettrocapacitiva, oggi realizzata anche con tecnologie micromeccaniche (trasduttori CMUT), rispetto a una sonda di tipo piezoelettrico senza contatto in aria ha una banda di frequenze più larga [9].

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

2.3.5 Microfono ottico

La lunghezza d'onda della luce in un mezzo dipende dal suo indice di rifrazione che è funzione della densità. Poiché un'onda sonora causa variazioni di pressione locali e quindi di densità si ha anche una variazione locale dell'indice di rifrazione che può essere rilevata attraverso il microfono ottico. Data l'assenza di parti meccaniche o deformabili il sensore è dotato di una risposta in frequenza lineare priva di risonanze e ad ampia banda. Questo dispositivo può essere utilizzato solo come ricevitore e di fatto si comporta come un interferometro laser integrato ^[10].

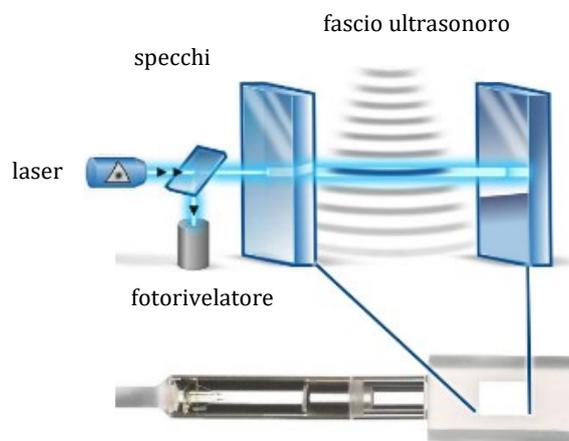


Fig. 6: struttura di un microfono ottico ^[10]

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

2.3.6 Generazione e rilevamento degli ultrasuoni mediante laser

Se la superficie di un campione viene illuminata da un impulso laser accadono differenti fenomeni fisici (Fig. 7) in base al materiale, allo stato di finitura superficiale e dalla sorgente laser.

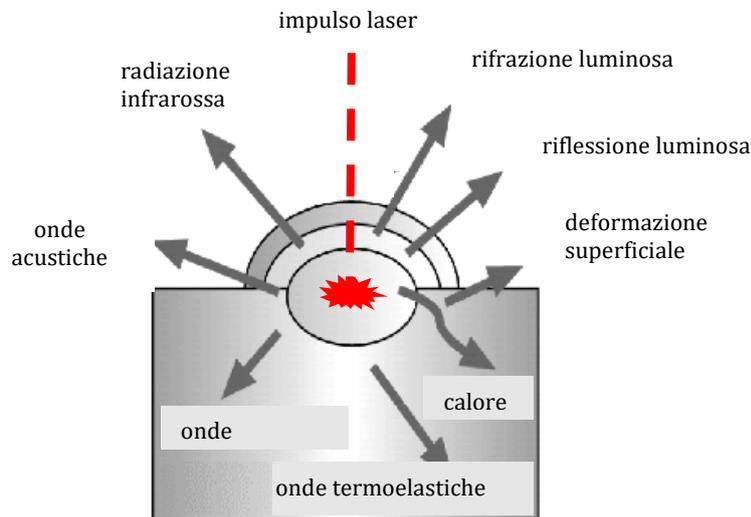


Fig. 7: fenomeni che si sviluppano quando una superficie è colpita da un fascio laser [32]; le onde termiche si sviluppano se la sorgente laser è di tipo pulsato.

Quando un impulso laser colpisce una superficie ovviamente cede energia al campione e si sviluppano gradienti termici tra il punto di impatto e il materiale circostante. Un fenomeno riguarda il gradiente di temperatura che genera deformazioni e tensioni che si traducono in onde elastiche nel solido, le quali possono avere frequenze nella banda ultrasonora. Questo effetto è la base del principio di funzionamento dei sistemi laser-ultrasonics. Affinché si originino fenomeni ondulatori il tipo di sollecitazione deve essere impulsiva e non di tipo cw (continuous wave) [11]. La frequenza principale dell'onda elastica prodotta dipende dalla durata dell'impulso laser mentre l'intensità e la modalità di come viene generata la vibrazione dipende dalla potenza assorbita [25]. Nel caso di potenze elevate, si ha una vera e propria ablazione o vaporizzazione del materiale nel punto di incidenza tra il laser e la superficie. Questo va a provocare la scomparsa di una piccola porzione di materiale e una piccola forza di richiamo, dovuta alla compressione longitudinale, sarebbe l'origine dell'onda elastica. Attraverso l'utilizzo di un laser ad alta potenza, con conseguente vaporizzazione del materiale, si può ottenere una intensità di vibrazione nel campione sicuramente

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

maggiore, tuttavia, per il vincolo di ispezione non distruttiva si devono utilizzare potenze in ingresso minori. In questo caso la generazione delle onde elastiche avviene grazie al surriscaldamento locale del punto di incidenza del laser; quindi, adesso la causa della generazione dell'onda è la dilatazione termica del materiale. In ogni caso si ha la generazione di onde S , L e T la cui direzione di propagazione preferenziale dipende dal materiale. Usando le formule riportate in letteratura [11] si è calcolata la forma della distribuzione di radiazione in una sezione integra, ortogonale all'asse della trave in entrambe le condizioni di sollecitazione (Fig. 8).

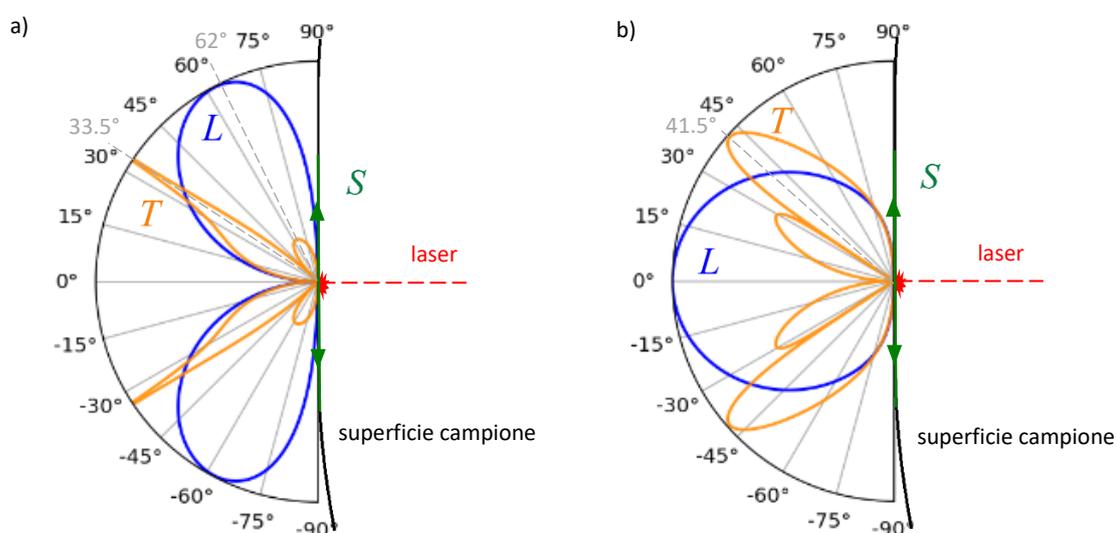


Fig. 8: diagrammi polari di propagazione di onde elastiche in sezione ortogonale all'asse della trave nelle condizioni a) regime termoelastico b) regime ablativo, per un acciaio ($\frac{v_L}{v_T} \approx 1.81$)

Nel regime termoelastico dopo pochi istanti l'energia termica si dissipa lasciando intatta la superficie, questo ci permette quindi di ripetere la misura un numero infinito di volte (considerando che il target sia di un materiale sufficientemente resistente alle sollecitazioni termiche).

Per un materiale metallico a temperatura ambiente investito da laser con lunghezza d'onda λ_l nell'infrarosso esiste un valore di transizione tra il regime termoelastico e regime ablativo che è legato all'intensità del flusso di calore assorbito e questo valore è circa 20 MW/cm^2 [12].

Per un mezzo omogeneo ed isotropo, soggetto alla sola forza di volume gravitazionale, il regime termoelastico innescato da una sorgente di calore è definito dalle seguenti equazioni differenziali [13] [26]:

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

$$\rho c_s \dot{T} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q} \quad (2.11)$$

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\mu + \lambda) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + \rho \vec{g} = (3\lambda + 2\mu) \alpha \nabla T + \rho \ddot{\vec{u}} \quad (2.12)$$

dove \dot{q} è la potenza termica per unità di volume generata dalla sorgente (legata a fenomeni di penetrazione), T temperatura in funzione della posizione e del tempo, \vec{u} campo degli spostamenti, \vec{g} costante di accelerazione gravitazionale, ρ densità, α coefficiente di dilatazione termica lineare, k coefficiente di conduzione termica del materiale, c_s calore specifico a volume costante, λ e μ sono le costanti elastiche di Lamé. Per un laser pulsato a profilo gaussiano, si ha [12]:

$$\dot{q}(r, z, t) = Q(t) A_c e^{-\frac{8r^2}{D_z^2}} e^{-A_c z} \quad (2.13)$$

$$Q(t) = \frac{E_l}{\tau_l} (1 - R) \frac{4}{\pi D_z^2} f(t) \quad (2.14)$$

con Q intensità sulla superficie del campione, E_l energia dell'impulso, τ_l durata dell'impulso laser, R coefficiente di riflessione della luce, A_c coefficiente di assorbimento della luce, z profondità dalla superficie di incidenza e il diametro del fascio definito dalla convenzione in Fig. 9.

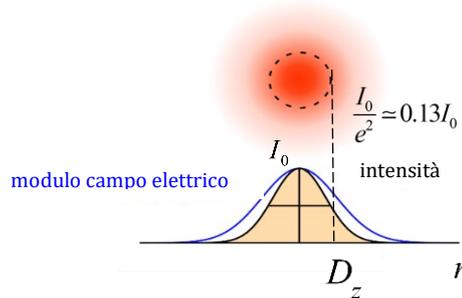


Fig. 9: laser a profilo gaussiano

Il coefficiente di riflessione elettromagnetica R dipende dalla conducibilità elettrica σ dalla permeabilità magnetica relativa μ_r del materiale ma anche dalla lunghezza d'onda del laser λ_l e può essere stimato in condizioni diffusive secondo [11]:

$$R = \frac{2 - 2\xi + 2\xi^2}{2 + 2\xi + 2\xi^2} \quad (2.15)$$

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

con $\xi = \frac{\mu_0 \sigma c}{\sqrt{\pi \sigma \mu_0 \mu_r \frac{c}{\lambda_l}}}$ dove $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ permeabilità magnetica del vuoto e

$c = 300 \times 10^6 \text{ m/s}$, velocità della luce nel vuoto.

Si riportano le proprietà fisiche medie per un acciaio coinvolte nelle (2.11)-(2.15) in tabella seguente.

proprietà medie acciaio		
coefficiente di dilatazione lineare	α	$12.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
coefficiente di conduzione termica	k	50 W/(m K)
calore specifico	c_s	480 J/(kg K)
costanti di Lamè	λ	$1.15 \times 10^{11} \text{ Pa}$
	μ	$7.69 \times 10^{10} \text{ Pa}$
conducibilità elettrica	σ	$7.04 \times 10^6 \text{ (}\Omega \text{ m)}^{-1}$
permeabilità magnetica relativa	μ_r	1900
coefficiente di assorbimento elm.	A_c	$3.87 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$

Tab. 4: proprietà medie degli acciai che subentrano nella generazione di onde elastiche causata da un impulso laser sulla superficie del pezzo [12]

Le relazioni (2.11)-(2.12) presentano diverse ipotesi semplificative:

- il calore specifico inserito dovrebbe essere quello a deformazione costante [26], che è un valore difficile da ricavare sperimentalmente quindi si approssima con quello a volume (o pressione) costante dato che il mezzo è solido;
- tutte le proprietà termoelastiche ed ottiche si considerano indipendenti dalla temperatura e dallo stato tensionale.

Queste relazioni possono essere risolte numericamente con un software di simulazione agli elementi finiti impostando le opportune condizioni iniziale e al contorno.

La (2.15) mette in evidenza che la generazione termica è tanto più efficiente se il laser ha una lunghezza d'onda maggiore.

Quando si deve generare una perturbazione ultrasonora a circa una data frequenza occorre stabilire quale sia la minima durata dell'impulso laser τ_l che la causa, minima in quanto un fenomeno ottico che viene convertito in termico e poi in termoelastico avrà una frequenza minore di un'onda ultrasonora generata da un trasduttore ideale a

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

parità di durata dell'impulso. Per generare ultrasuoni negli acciai con frequenze fino a 10 MHz occorre $\tau_l \lesssim 50 \text{ ns}$ [11], valore che può essere ottenuto attualmente impiegando laser di tipo Q-switched.

Il laser può essere usato anche nella ricezione dell'onda ultrasonora, principalmente secondo un principio di vibrometria laser doppler oppure secondo tecniche interferometriche [15]. Nel primo caso (Fig. 10 a) viene sfruttato il fatto che la superficie del campione vibra a frequenza ultrasonora e quindi produce un effetto doppler sul segnale luminoso che viene rilevato da un fotorivelatore. Tale effetto può essere risolto con un demodulatore ottico e trasdotto in misure di velocità del punto superficiale. Nella seconda architettura (Fig. 10 b) la differenza di fase tra due raggi laser della sorgente, scomposti con un sistema opportuno di specchi, è usata per trasdurre lo spostamento superficiale dal segnale di uscita del fotorivelatore.

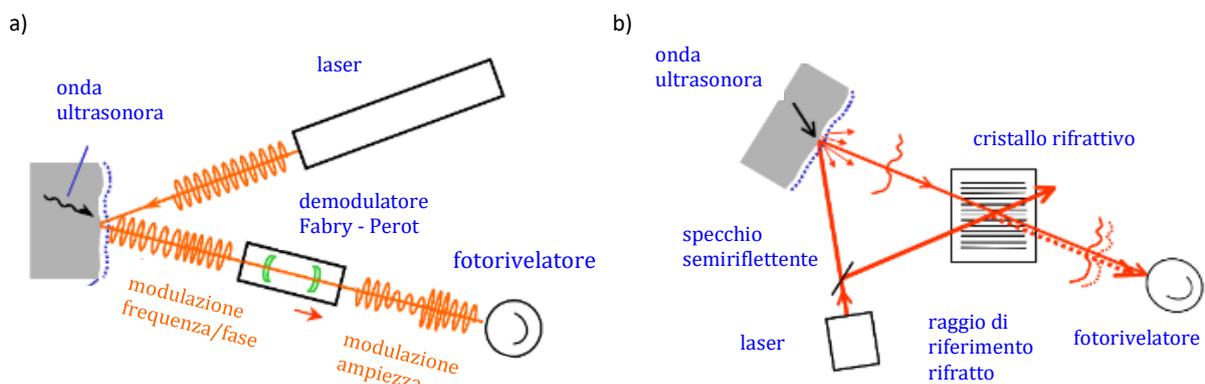


Fig. 10: setup fondamentali per il rilevamento di vibrazioni ultrasonore con laser:
a) vibrometria laser Doppler
b) interferometria

I vantaggi di usare un sistema laser per il rilevamento di onde ultrasonore sono la possibilità di avere un sistema di rilevamento più lontano dal campione sotto ispezione rispetto a una sonda senza contatto, la possibilità di avere una risposta in frequenza piatta, utile nel caso di mezzi dispersivi e l'elevata risoluzione spaziale che si può ottenere spostando il punto di misura. Tuttavia il sistema diagnostico assume una certa complicazione e i principali svantaggi che frenano le sue applicazioni industriali sono legate alle caratteristiche del laser che deve essere ad elevata monocromaticità, un ottica che garantisce a eventuali raggi interferenti una elevata coerenza e la non

2. Campioni e metodi di ispezione non distruttiva

linearità del sistema che non consente operazioni di filtraggio in post-processamento (ad esempio per eliminare rumore a bassa frequenza) ^[11].

Nondimeno l'applicazione di queste tecniche è fortemente influenzata dalle condizioni di riflettività della superficie di misura. Idealmente deve essere diffusiva, ma nelle applicazioni industriali i componenti sono solitamente coperti di olio, polvere o grasso che assorbono il fascio luminoso oppure nel caso opposto di superfici molto riflettenti la posizione del fotorivelatore diventa cruciale nella acquisizione del segnale ^[16].

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

In questo capitolo viene motivata la scelta di usare la tecnologia laser-ultrasonics come tecnica diagnostica sulla base dei difetti nei campioni, dei vincoli sul sistema e della generazione di ultrasuoni discussi in precedenza, mostrando il setup sperimentale adottato.

3.1 Generazione di ultrasuoni mediante impulsi laser e rilevamento con sonda piezoelettrica senza contatto

Affinché il sistema rispetti i vincoli descritti nel paragrafo 2.1 e si ottenga una sufficiente sensibilità al segnale generato l'apparato sperimentale adottato conta di un laser Nd:YAG Q-switched per la generazione delle onde ultrasonore sul campione e di una sonda piezoelettrica senza contatto per il rilevamento. Si riepilogano i vantaggi di usare un sistema laser invece che una sonda vibrante per la generazione di ultrasuoni:

- la sorgente di ultrasuoni diventa il campione stesso e quindi viene meno il problema della trasmissibilità acustica dalla sonda alla parte sotto ispezione: il laser può essere posizionato a distanza superiore dalla sonda a ultrasuoni, che anzi per trasmettere la massima energia acustica al campione dovrebbe trovarsi a contatto con la superficie;
- in un fluido attraverso la sonda si genera un fascio ultrasonoro collimato su una direzione preferenziale, mentre l'impulso laser genera una propagazione su più direzioni (Fig. 8) permettendo di intercettare le difettosità in geometrie complesse, anche se ciò complica l'analisi del segnale acquisito;
- il laser ha una durata dell'impulso dell'ordine dei ns invece una sonda vibrante ha un impulso di emissione dell'ordine dei μ s: per via del tempo di smorzamento dell'oscillazione ("ringing") si ha un mascheramento della risposta del materiale in prossimità della superficie e quindi difettosità superficiali o sub-superficiali potrebbero non essere rilevabili con generatori a distanze corte dal campione.

Un'altra caratteristica che differenzia i due sistemi di generazione è l'ampia banda di risposta in frequenza del materiale quando colpito dall'impulso laser contro la banda stretta data dalla risonanza della sonda vibrante. Questo aspetto di per sé non è un

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

vantaggio dato che il trasduttore di ricezione è scelto sulla base della frequenza del fascio ultrasonoro però si evince che uno stesso laser in generazione può essere accoppiato con trasduttori diversi in ricezione. La scelta di usare una sonda piezoelettrica senza contatto nell'acquisizione della risposta ultrasonora del campione nasce come compromesso dal fatto che un sistema laser sarebbe stato più costoso, più complesso da gestire nella calibrazione ed elaborazione del segnale data la non linearità e la superficie del campione che risulta eterogenea.

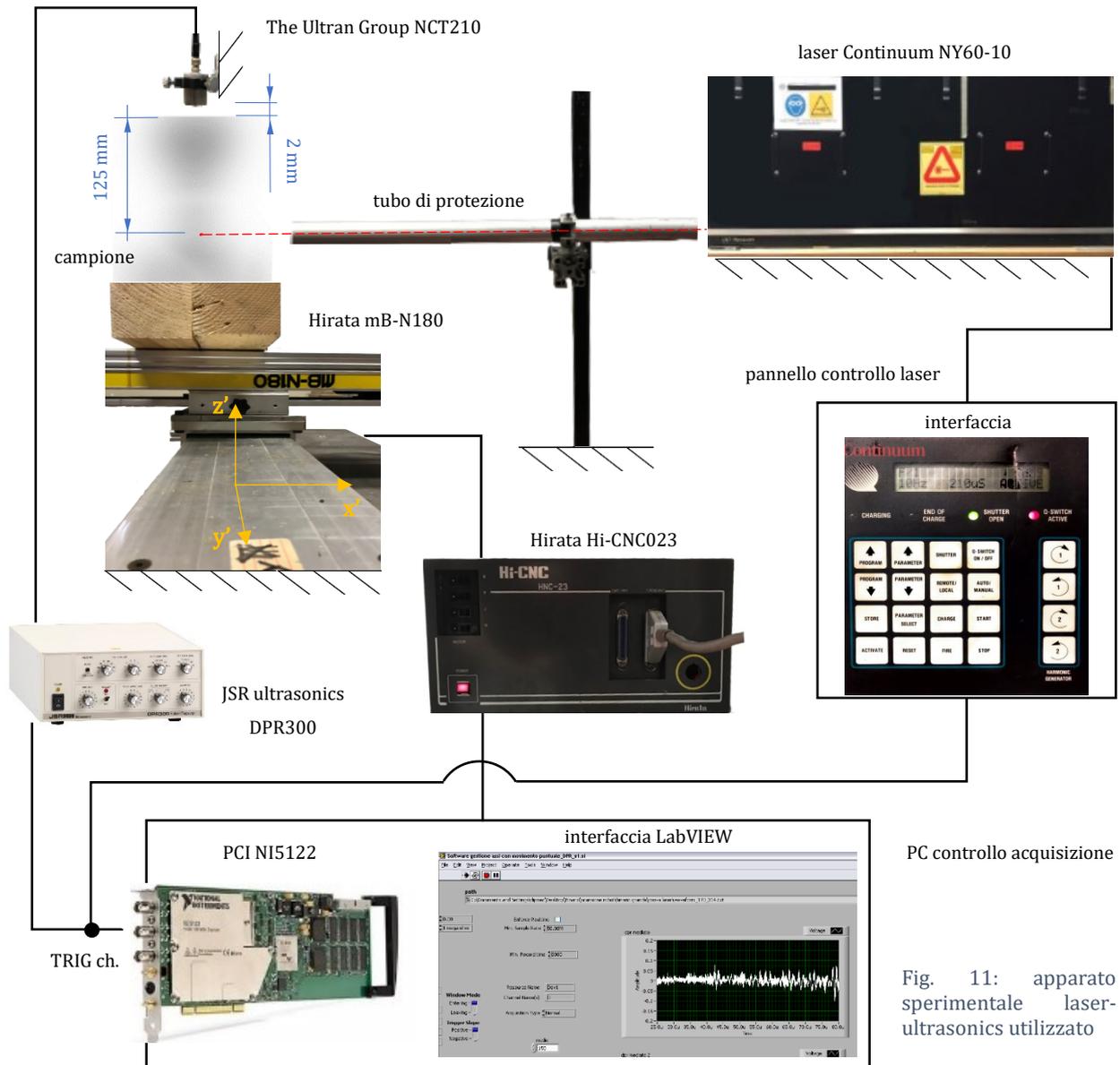


Fig. 11: apparato sperimentale laser-ultrasonics utilizzato

Risoluzione e sensibilità della sonda sono inoltre sufficienti per l'applicazione e non c'è necessità di inclinare la sonda perché il campione presenta una superficie superiore piana. La tipologia piezoelettrica ha mostrato sperimentalmente un rapporto segnale-

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

rumore più basso di una sonda elettrocapacitiva ma una risoluzione maggiore (poiché quella disponibile ha una banda spostata a frequenze minori) [25], motivo per cui per rilevare i difetti descritti si è scelto di usare questa tipologia di trasduttore.

3.2 Setup sperimentale utilizzato

In Fig. 11 è riportato il layout del setup sperimentale utilizzato. Di seguito sono descritti i componenti.

3.2.1 Laser Continuum NY60-10

Il laser Continuum NY60-10 è un laser allo stato solido di tipo Nd:YAG Q-switched. Le principali caratteristiche coinvolte per il sistema di diagnostica sono riportate in Tab. 5.

specifiche laser Continuum NY60-10	
lunghezza d'onda λ_l	1064 nm
energia dell'impulso $E_{l,max}$	225 mJ
durata dell'impulso τ_l	(7 ± 1) ns
repetition rate f_p	10 Hz
deriva di potenza (a 8h di funz.)	± 19.5 mJ
diametro D_0	6 mm
divergenza fascio φ	$26 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
divergenza puntamento γ	$14 \times 10^{-3} \text{ }^\circ$
distribuzione intensità campo lontano	gaussiana

Tab. 5: specifiche valide per $\lambda_l = 1064$ nm [27]

Il laser è posto a una distanza di $L \simeq 2000$ mm dal campione e nota la divergenza del fascio si calcola, attraverso semplici considerazioni geometriche (Fig. 12), il diametro D dello spot sulla superficie del campione pari a $D = 2L \cdot tg \frac{\varphi}{2} + D_0 \simeq 6.9$ mm. Questo rappresenta anche la dimensione superficiale della sorgente ultrasonora.

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

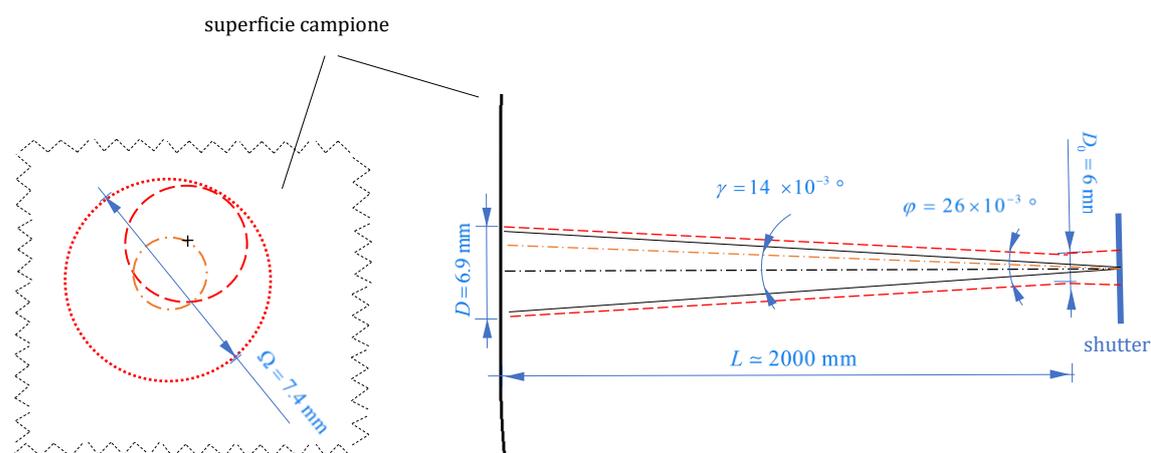


Fig. 12: divergenza e instabilità di puntamento del raggio laser

Se da un lato la dimensione della sorgente deve essere sufficiente per inviare onde ultrasonore captabili dal ricevitore, dall'altro è bene che sia contenuta per avere risoluzione sulle difettosità.

Inoltre la divergenza e l'instabilità angolare del raggio laser fanno sì che la traccia del laser sul pezzo sia di dimensioni superiori allo spot D . È importante calcolare il diametro Ω di questa zona per assicurarsi che il raggio interessi sempre punti del campione e non lo oltrepassi ai bordi o attraverso fori come nel campione L605, sia per ragioni di sicurezza sia di condizioni di acquisizione del segnale.

Si ha che $\Omega = I + D = 2L \cdot \text{tg} \frac{\gamma}{2} + D \approx 7.4 \text{ mm}$.

L'energia dell'impulso può essere regolata da pannello impostando un tempo di caricamento prima dell'apertura dello shutter, qui impostato a $210 \mu\text{s}$, che corrisponde a $E_l \approx 220 \text{ mJ}$. Dalle formule (2.14)-(2.15), note le specifiche del laser a profilo gaussiano (Tab. 5) e i parametri del materiale (Tab. 4), si può quantificare il coefficiente di riflessione elettromagnetica del campione $R \approx 0.3$ e quindi l'intensità

massima sulla superficie del pezzo pari a $Q_0 = \frac{E_l}{\tau_l} (1 - R) \frac{4}{\pi D^2} \approx 59 \text{ MW/cm}^2$, valore di

molto superiore alla soglia 20 MW/cm^2 . Ciò indica che la generazione dell'ultrasuono avverrà con vaporizzazione di un substrato superficiale, in regime ablativo come dimostra la traccia di incisione lasciata durante una scansione (Fig. 13). Sebbene il sistema diagnostico debba essere progettato come strumento non distruttivo si è voluto condurre le acquisizioni dei segnali mantenendo una potenza elevata affinché ci

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

sia un rapporto segnale rumore sufficiente. Se i difetti sono rilevabili si potrà ripetere le acquisizioni abbassando la potenza emessa e ripristinando il vincolo di test non distruttivo.



Fig. 13: traccia di incisione lasciata dagli impulsi laser durante la scansione per il L280 difetto testa

La diminuzione della potenza del laser può essere fatta o da pannello di controllo oppure impiegando lenti divergenti che aumentano il diametro dello spot laser. Quest'ultimo influenza anche la dimensione della sorgente ultrasonora che se da un lato deve essere di dimensione sufficiente da trasmettere gli ultrasuoni fino al ricevitore prima che vengono attenuati eccessivamente, dall'altro diminuisce la risoluzione spaziale della difettosità.

La durata dell'impulso laser $\tau_l \simeq 7$ ns scelta è sufficiente per generare ultrasuoni fino a 20 MHz [11]. La lunghezza d'onda $\lambda_l = 1064$ nm nel vicino infrarosso permette di avere un coefficiente R sufficientemente basso, tuttavia richiede delle precauzioni maggiori nell'utilizzo del laser quale l'utilizzo di schermi visivi e un tubo di protezione entro cui propagare il raggio. La velocità massima di scansione è data da:

$$v_{scan}^{max} = \delta \frac{f_p}{N_m} \quad (3.1)$$

con δ risoluzione spaziale lungo l'asse di scansione e N_m numero di acquisizioni per uno stesso punto di misura con cui si calcola la media e si ottiene l'acquisizione risultante.

Il tempo minimo che intercorre due misure su punti consecutivi è infatti pari al ciclo di acquisizione di N_m waveform su un punto. Questo è un valore di velocità di scansione limitato superiormente perché non tiene conto di tempi di calcolo e della velocità con cui si sposta la sonda nel punto successivo prima della nuova acquisizione.

Quindi la repetition rate rappresenta un compromesso tra la velocità di scansione e il tempo di acquisizione T_{daq} che dovrà essere $T_{daq} < \frac{1}{f_p}$ in quanto ogni acquisizione dovrà

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

essere relativa alla risposta del campione a un singolo impulso laser. Si comprende come se f_p è troppo elevato T_{daq} risulterà molto limitato e la ricezione del segnale ultrasonoro potrebbe non avvenire dati i tempi di percorrenza delle onde, oltre che alla latenza della sonda in ricezione. Inoltre f_p è limitata anche dalla potenza del laser $\frac{E_l}{\tau_l}$, altrimenti si hanno derive di temperatura nel campione con il rischio sia di danneggiarlo sia di alterare le condizioni di acquisizione tra una misura e la successiva. La deriva di potenza segnalata nelle specifiche dello strumento è da tenere in considerazione qualora il sistema diagnostico venga utilizzato per un elevato tempo di funzionamento continuativo, ad esempio nel caso di strutture molto estese. Il pannello di controllo laser è collegato con il canale di uscita trigger alla scheda di acquisizione.

3.2.2 Sistema di movimentazione Hirata

Il sistema di movimentazione comprende Hirata mB-N180, un robot cartesiano a 2 g.d.l x-y e il relativo controllore numerico Hirata Hi-CNC023 (Fig. 11).

Il campione alloggia su un supporto di legno appoggiato sulla guida mobile del robot che tramite il controllo numerico può spostarlo nel piano x-y con risoluzione fino a 0.5 mm per entrambi gli assi. La posizione del campione rispetto alla sonda è gestita tramite il PC di controllo acquisizione che comunica con il controllore numerico attraverso il protocollo di comunicazione proprietario HRCS-R. Il controllore consente anche di impostare un'area di movimentazione entro la quale poter eseguire le scansioni in modo da evitare che il campione urti contro il tubo di protezione del laser.

3.2.3 The Ultran Group NCT210

Il ricevitore The Ultran Group NCT210 è una sonda senza contatto di tipo piezoelettrico con frequenza centrale 1 MHz e banda passante 0.6MHz-1.4MHz, con diametro della superficie sensibile pari a 0.5". Quindi l'ordine di grandezza della dimensione media del difetto rilevabile con questo strumento è ≈ 5.8 mm in base alla (2.1), valore compatibile con le dimensioni delle difettosità di Tab. 1.

Anche se senza contatto per acquisire con sufficiente sensibilità la sonda deve essere posizionata a pochi millimetri dalla superficie del campione, funzionando come un

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

trasduttore proximity di fatto. Fissando la sonda ad un supporto regolabile si è mantenuta una distanza $d \simeq 2$ mm dalla superficie di acquisizione, con inclinazione rispetto alla verticale $\simeq 0^\circ$ in quanto per la (2.7) si ha β trascurabile. Una distanza così ravvicinata dalla sonda è giustificata dal voler ottenere un rapporto segnale-rumore sufficiente per rilevare le difettosità mantenendo la possibilità di aumentarla nell'applicazione industriale.

3.2.4 JSR ultrasonics DPR300

JSR ultrasonics DPR300 è uno strumento per condizionare il segnale in ingresso (/uscita) a (/da) un trasduttore per ultrasuoni [28]. Ha diverse funzioni: generazione di forme d'onda, filtraggio passabanda, amplificazione e trigger. Nel setup sperimentale utilizzato (Fig. 11) è stato utilizzato come amplificatore del segnale in uscita dalla sonda piezoelettrica in modo che il range di voltaggio è compatibile con la scheda di acquisizione. Si è impostato il guadagno di amplificazione su +66 dB (massimo). Il dispositivo è collegato in uscita al canale di trigger della scheda di acquisizione.

3.2.5 PC controllo acquisizione

L'acquisizione del segnale è gestita da un pc tramite software LabVIEW dedicato. La scheda di acquisizione PCI NI5122 connessa alla scheda madre tramite PCI bus ha le seguenti specifiche e settaggi utilizzati nell'apparato sperimentale:

specifiche PCI NI5122	
massima larghezza di banda (-1 dB)	100 MHz
massima frequenza di campionamento f_s^{\max}	100 MS/s
n° bit n_b	14
capacità memoria	32 MB
tensione massima ingresso analogico V_0	5V
RMS rumore (< 100 kHz)	2.5mV

Tab. 6: specifiche scheda di acquisizione National Instrument utilizzata [29]

Per massima larghezza di banda si intende l'onda sinusoidale di frequenza più elevata che può essere digitalizzata con minima attenuazione poiché la scheda di acquisizione

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

ha una risposta in frequenza di tipo passa basso [29]. L'errore di discretizzazione del segnale vale quindi $e_b = \frac{V_0}{2^{n_b-1}} \approx 0.6 \text{ mV}$. La massima frequenza del segnale rilevata dalla

sonda a ultrasuoni è $\approx 1.4 \text{ MHz}$ quindi f_s^{\max} è sufficiente così come la larghezza di banda che non restituisce distorsioni. Nell'acquisizione è stata utilizzata una frequenza di campionamento costante $f_s = 50 \text{ MS/s}$ (acquisition type "normal" in Fig. 15).

L'acquisizione è di tipo punto-punto e l'interfaccia LabVIEW prevede un pannello per definire i punti di scansione e la risoluzione secondo il riferimento $x'y'$ a telaio robot. Ai fini dell'acquisizione il sistema di riferimento di interesse definito è xy , solidale al campione, con cui si definisce la posizione della sonda piezoelettrica rispetto ad esso. Ovviamente i riferimenti xy e $x'y'$ sono semplicemente legati da una relazione di traslazione e rotazione di 180° attorno all'asse z (Fig. 14). L'area di scansione è delimitata dai punti da cui la sonda piezoelettrica ha una distanza costante di $\approx 2 \text{ mm}$, quindi dal tratto di superficie piana nella parte superiore del campione. L'orientamento del campione sul supporto è stato calibrato per punti, attraverso coordinate inserite nel pc di controllo acquisizione in modo che impostando $x = 110 \text{ mm}$ nel programma di controllo degli assi del robot e facendo variare la posizione y la sonda si trova in corrispondenza dell'asse di mezzeria del campione precedentemente tracciato. Questo orientamento rispetta il vincolo di accessibilità definito in 2.1.2. In base alle specifiche dei difetti (Tab. 1) la risoluzione spaziale di scansione usata vale $\delta = 1 \text{ mm}$ per entrambi gli assi.

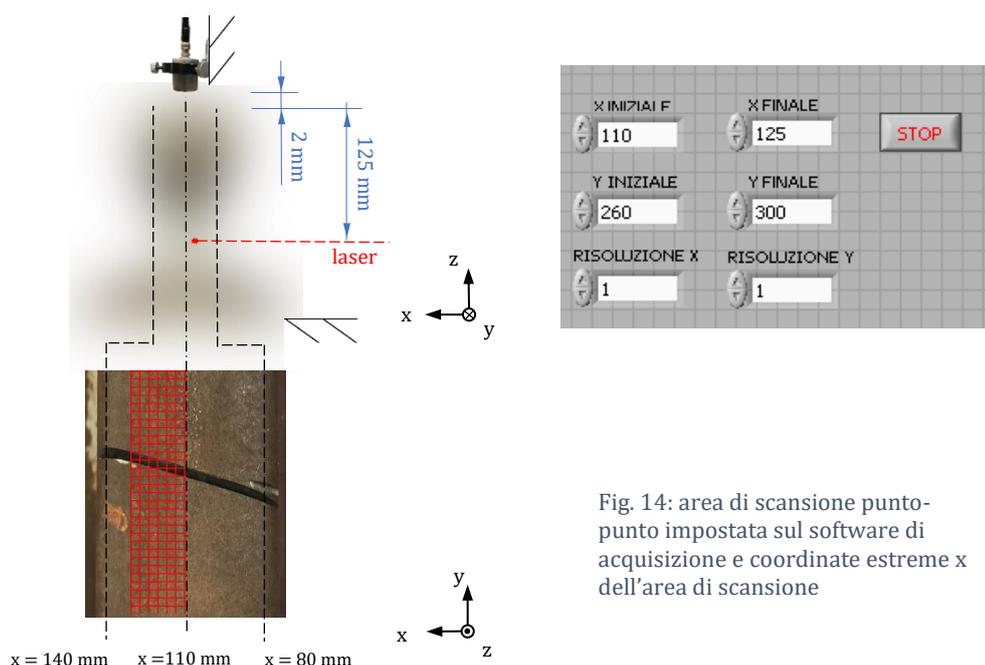


Fig. 14: area di scansione punto-punto impostata sul software di acquisizione e coordinate estreme x e y dell'area di scansione

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

La scheda PCI NI5122 include anche il trigger con cui sincronizzare l'apertura dello shutter del laser e l'acquisizione da parte della sonda piezoelettrica, motivo per cui nello schema di Fig. 11 le uscite degli strumenti convergono nel canale TRIG.

Il trigger impostato è di tipo edge con condizioni di attivazione su un valore di soglia del segnale associato e della sua derivata (Fig. 15).

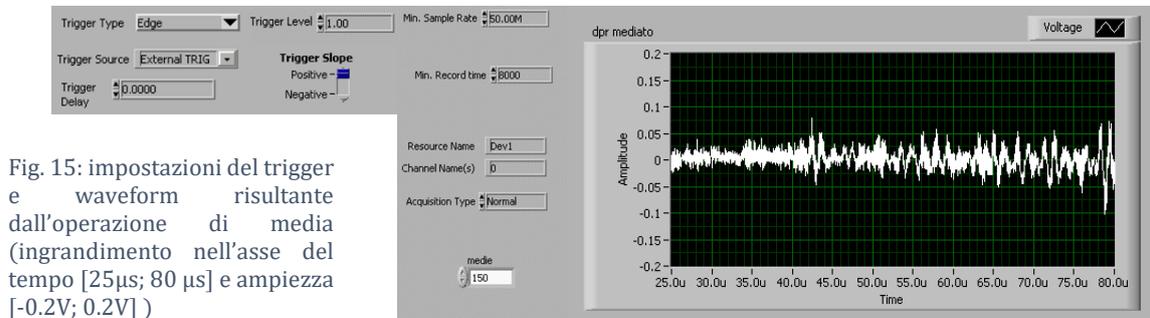


Fig. 15: impostazioni del trigger e waveform risultante dall'operazione di media (ingrandimento nell'asse del tempo [25µs; 80 µs] e ampiezza [-0.2V; 0.2V])

L'interfaccia presenta il grafico del segnale acquisito per monitorare l'acquisizione con i relativi parametri (Fig. 15).

Data la frequenza di campionamento $f_s = 50\text{MS/s}$ si sceglie un numero di punti del segnale $M = 8000$ S tale che $T_{daq} = \frac{M}{f_s} = 160 \mu\text{s}$. Il tempo di acquisizione è sufficiente

per acquisire la risposta del componente sotto esame all'impulso laser. Si può stimare il tempo di percorrenza di interesse più lungo, ovvero quello di un'onda superficiale S che si origina dallo spot laser, viene riflessa da una difettosità alla base e si propaga verso il punto di acquisizione più lontano (Fig. 16). Si può usare questo tempo di arrivo come ordine di grandezza dei tempi di arrivo in quanto è il tipo di onda che si propaga a velocità minore. Nota la lunghezza ℓ del percorso d'onda di questo percorso d'onda (questo valore è stato misurato con il comando "Misura" in SolidWorks avendo a disposizione il disegno CAD del campione) è possibile stimare il tempo di arrivo alla sonda come

$$ToA_s(x = 140 \text{ mm}) \approx \frac{\ell}{v_s} + \frac{d}{v_0} \approx 84.4 \mu\text{s}.$$

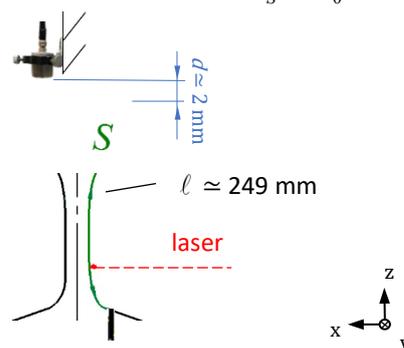


Fig. 16: cammino d'onda dell'onda superficiale che si genera con l'impulso laser

3. Sistema laser-ultrasonics utilizzato

È da considerare che le onde riflesse dai bordi del componente che arrivano alla sonda sono solo di tipo L e T , e diventano onde superficiali solo se viene superato un angolo critico di incidenza con la superficie come descritto in 2.3.1. Per cui queste onde sebbene potrebbero avere un percorso più lungo di quello rappresentato in Fig. 16 hanno velocità di propagazione maggiore (Tab. 3). Le varie incertezze sulle grandezze: su ℓ , a sua volta dipendente dall'incertezza di misura sulla posizione dello spot laser e sulle velocità di propagazione delle onde, giustificano un tempo di acquisizione pari a $160 \mu\text{s}$.

Questa durata è compatibile sia con la repetition rate del laser $T_{daq} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ s} < \frac{1}{f_p} = 0.1 \text{ s}$, sia con la capacità di memoria della scheda di acquisizione. Considerando che per avere un sufficiente rapporto segnale- rumore si è scelto un numero di segnali con cui calcolare il segnale medio risultante (linear averaging) pari a $N_m = 150$ [25] e la lunghezza di ciascun segnale è $M = 8000 \text{ S}$ si stima una occupazione di memoria ad acquisizione pari a $\approx 2.5 \text{ MB}$ secondo la procedura di calcolo riportata [29], abbondantemente inferiore a quella disponibile (Tab. 6).

In base ai valori scelti la velocità massima di scansione (3.1) vale $v_{scan}^{\text{max}} = 0.067 \text{ mm/s}$.

Ciascuna acquisizione di Fig. 15 viene salvata in un file .txt nominato con le coordinate di scansione e risoluzione impostata, in formato CSV (ciascun numero rappresenta il valore campionato, in Volt). L'organizzazione del dataset è mostrata in figura seguente.

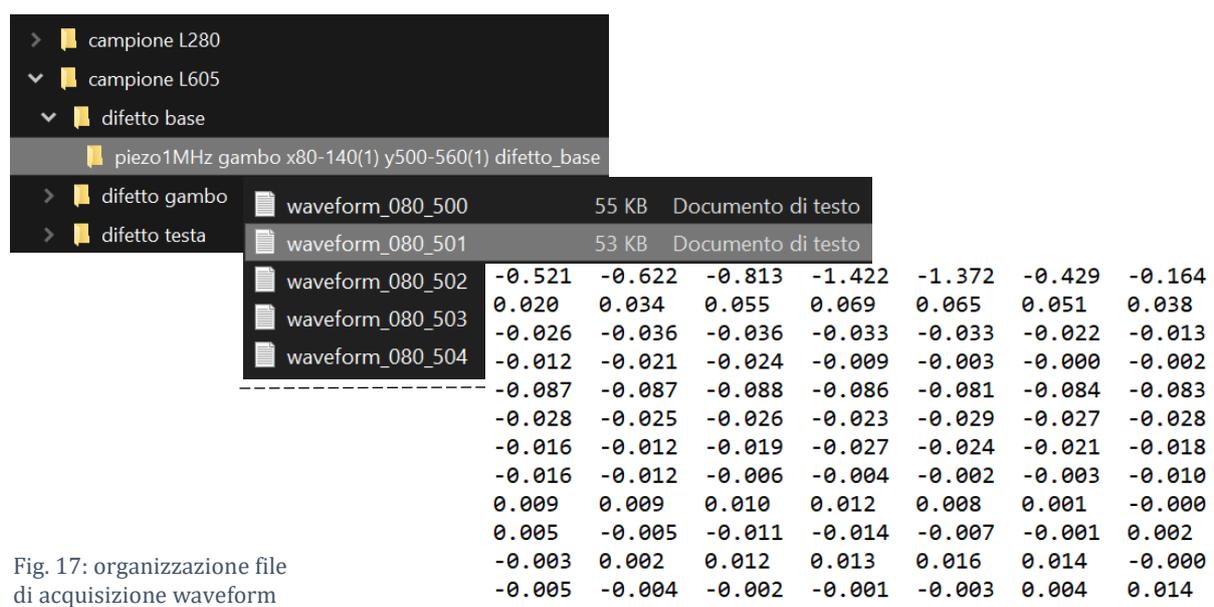


Fig. 17: organizzazione file di acquisizione waveform

3.3 Tabella parametri di acquisizione

modalità di acquisizione	punto-punto
banda di risonanza ricevitore	[0.6 MHz; 1.4 MHz]
risoluzione scansione δ	1 mm
frequenza di campionamento f_s	50 MHz
numero segnali linear avg. N_m	150
tempo di acquisizione segnale T_{daq}	160 μ s
intensità laser sulla superficie Q_0	≈ 59 MW/cm ²
posizione spot laser	sul gambo, a 125 mm dalla superficie superiore del campione
dimensione spot laser sul campione D	≈ 7 mm
distanza sonda - campione d	≈ 2 mm
inclinazione sonda	$\approx 0^\circ$
velocità di scansione	< 0.067 mm/s



Tab. 7: tabella parametri di acquisizione utilizzati nel setup sperimentale in Fig. 11

4. Analisi del segnale

In questa parte viene illustrata l'elaborazione del segnale che permette di rilevare le difettosità in Tab. 1. Nella diagnostica a ultrasuoni vengono impiegati tre sistemi di rappresentazione del segnale rilevato dalle sonde sul pezzo in esame. Tali scansioni sono contraddistinte con le lettere A, B, C:

- A-scan: è il grafico dell'andamento temporale della waveform acquisita;
- B-scan: è un grafico che aggiunge a un grafico A-scan l'asse di una dimensione di scansione;
- C-scan: questo grafico rappresenta la distribuzione nell'area di scansione di un valore di sintesi di ogni registrazione della waveform.

Ogni acquisizione di Fig. 17 è stata strutturata in un array $[x, y, \text{waveform}]$. Poiché si vuole osservare anche la forma della difettosità individuata sono stati analizzati grafici C-scan.

4.1 Filtraggio delle waveform

Con la frequenza di campionamento scelta $f_s = 50\text{MHz}$, ciascuna waveform di $M = 8000$ punti si presenta con un andamento temporale discreto di passo $dt = \frac{1}{f_s} = 0.02$ μs . Ogni file di acquisizione si presenta come di seguito:

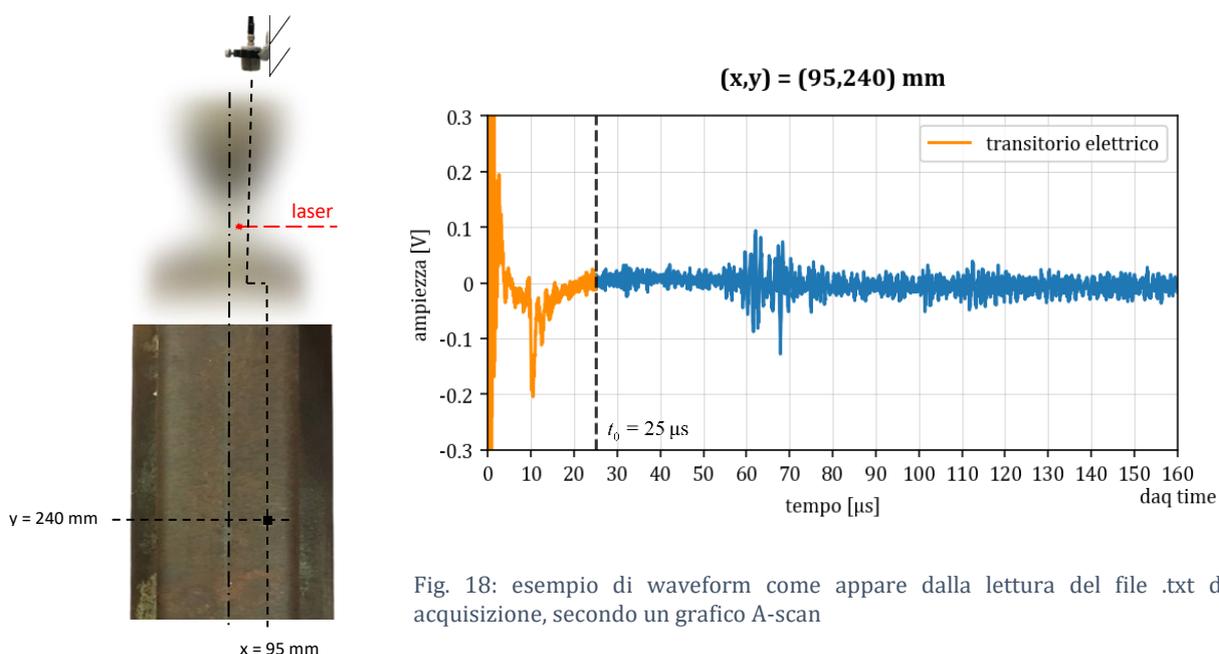


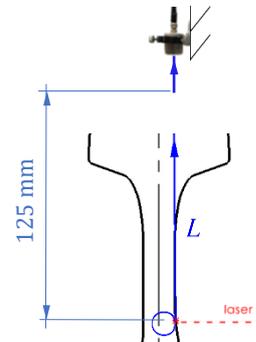
Fig. 18: esempio di waveform come appare dalla lettura del file .txt di acquisizione, secondo un grafico A-scan

4. Analisi del segnale

La waveform raw presenta l'uscita elettrica della sonda quando è avviata dal trigger, quindi si avrà un transitorio elettrico che maschera totalmente la ricezione di onde ultrasonore.

Si definisce quindi un tempo di taglio $t_0 = 25 \mu\text{s}$ con cui delimitare l'inizio dell'array di acquisizione di interesse. Questo valore è scelto come compromesso tra l'estinguersi del transitorio elettrico e l'arrivo dei primi wavepacket di risposta del materiale (segnale). Considerando le direzioni principali di propagazione mostrate nel grafico b) di Fig. 8 e ammesso un percorso diretto limite composto da onde L si stima infatti un tempo di arrivo $\simeq t_0$. Questo valore è poi solo teorico perché in base ai diagrammi polari di Fig. 8 una propagazione tangente al bordo di onde longitudinali produrrebbe un segnale tendenzialmente nullo e quindi non rilevabile dal ricevitore o mascherato dal rumore.

percorso d'onda		
onda	distanza [mm]	tempo [μs]
longitudinale	125,0	21,4
distanza sonda-campione	2,0	5,9
		ToA
		[μs]
		26,3



percorso d'onda		
onda	distanza [mm]	tempo [μs]
trasversale	20,1	6,2
trasversale	18,9	5,8
trasversale	19,1	5,9
longitudinale	47,8	8,2
superficiale	89,1	29,8
distanza sonda-campione	2,0	5,9
		ToA
		[μs]
		61,8

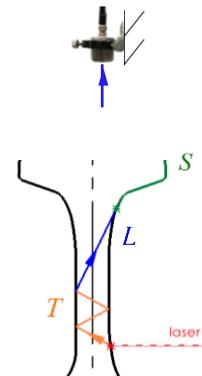


Fig. 19: valutazione dei tempi di arrivo in base al percorso d'onda

t_0 è indipendente dal punto di acquisizione (x, y). Se si considerano percorsi d'onda per lo stesso punto di acquisizione come quello di Fig. 19, composti da onde riflesse che

4. Analisi del segnale

hanno subito una conversione di modo in base alle (2.2)-(2.7) i tempi di arrivo sono significativamente superiori.

La waveform presenta una media non nulla (componente DC dell'ordine di 10^{-3} V) che non porta alcuna informazione sul segnale, legato a una oscillazione nella banda di frequenza della sonda piezoelettrica e quindi è stata rimossa.

È stato poi analizzato il contenuto in frequenza della waveform risultante.

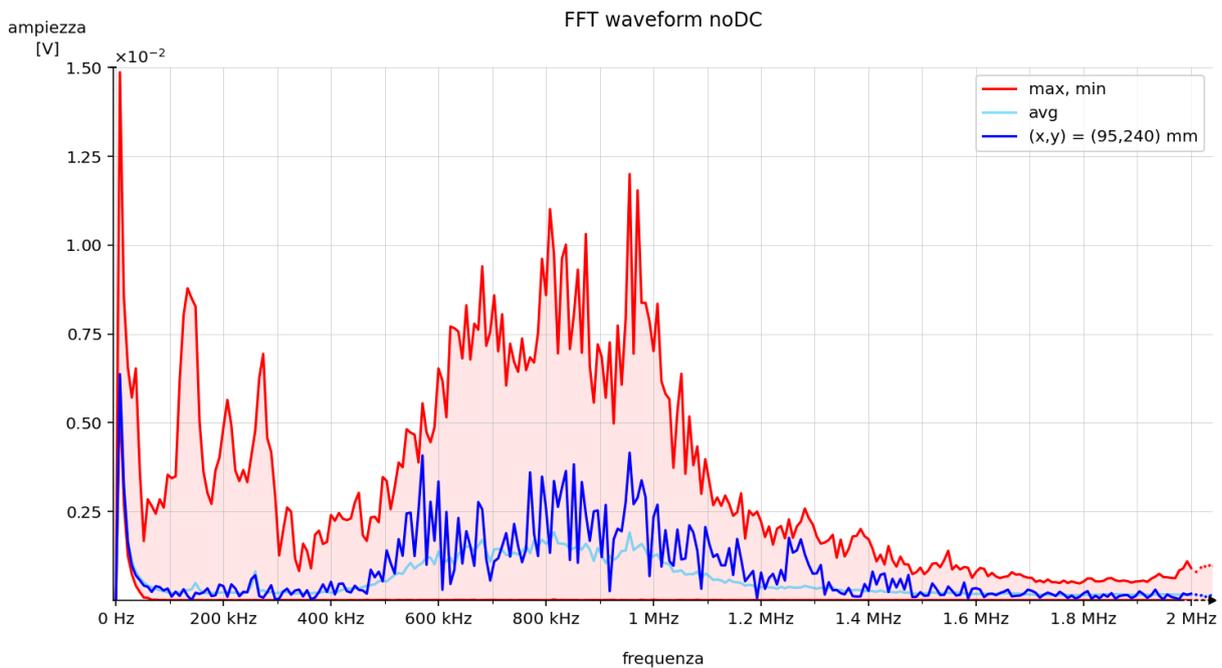


Fig. 20: fascia di variabilità dello spettro delle waveform acquisite

Il grafico evidenzia la banda di risposta della sonda [0.6 MHz; 1.4 MHz] dove è contenuto il segnale e rumore a frequenze inferiori di natura elettronica (es° rumore imputabile alla scheda di acquisizione a frequenze <100 kHz e rumore elettrico con armonica fondamentale di 50 Hz).

Si definiscono $\varepsilon(t)$ la differenza in valore in valore assoluto tra due campioni consecutivi di una waveform (quindi tra quello all'istante t e quello all'istante $t + dt$) e ε_0 tale valore valutato tra campione iniziale e finale.

L'errore di leakage nello spettro può essere valutato con il seguente indicatore:

$$\text{leak} = \max_{x,y} \frac{\varepsilon_0}{\max_t \varepsilon(t)} \quad (4.1)$$

È stato ottenuto un valore $\text{leak} = 17.5 \gg 1$ che evidenzia come ci sia una distorsione nello spettro data dal troncamento dell'acquisizione a $160 \mu\text{s}$. È stato poi valutato

4. Analisi del segnale

l'effetto della applicazione di una finestra di Hann per mitigare il leakage (Fig. 21), molto utilizzata in segnali di vibrazioni a banda stretta [30] come questo caso.

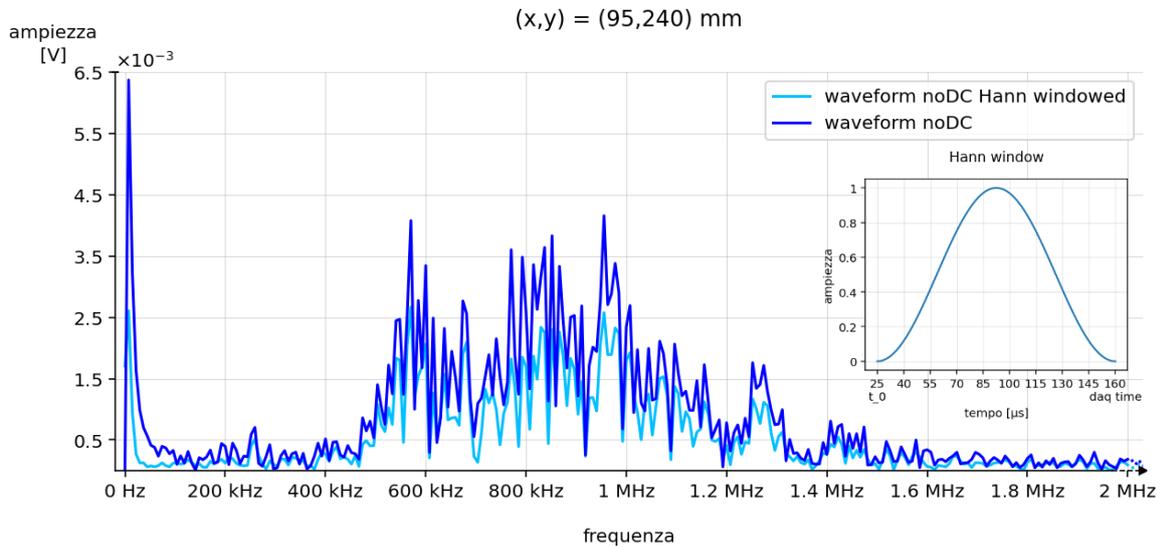


Fig. 21: confronto tra waveform finestrata e non nel dominio della frequenza

La finestratura non restituisce una forma dello spettro molto diversa nella banda del segnale, per contro viene attenuato. Nel dominio del tempo non si possono utilizzare soglie o fare confronti tra i wavepacket in ampiezza in arrivo su un segnale finestrato, motivo per cui si è scelto di continuare l'elaborazione numerica senza adottare la finestra di Hann. Successivamente a ciascuna waveform è stata applicato un filtro Butterworth passabanda centrato sulla frequenza di risonanza della sonda piezoelettrica per estrarre il maggior contenuto di segnale (Fig. 22).

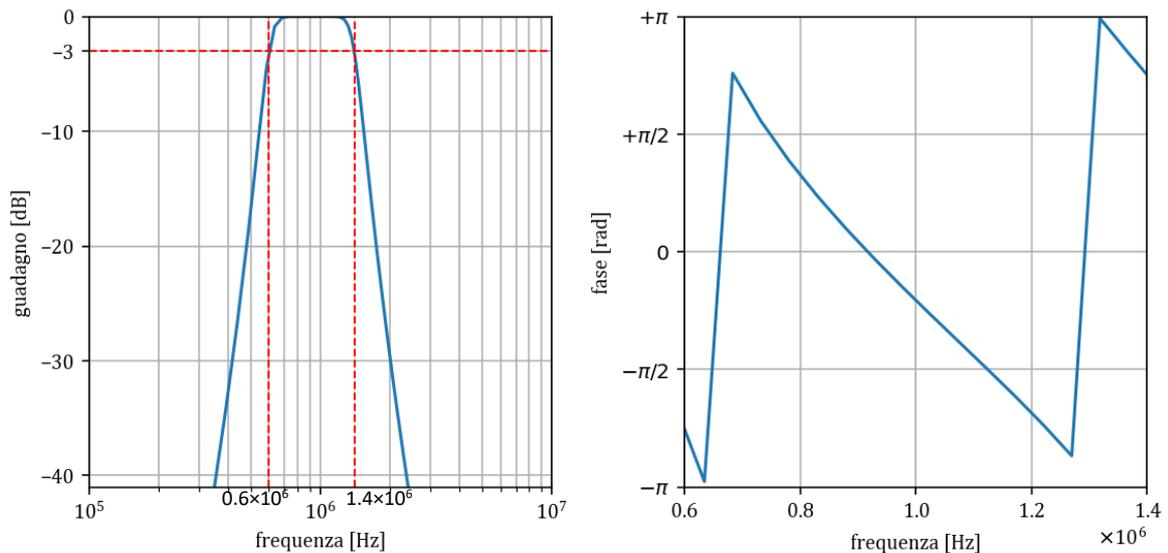


Fig. 22: filtro Butterworth di ordine 5 applicato alle waveform

4. Analisi del segnale

Una caratteristica di questo tipo di filtro è la linearità di fase. Il risultato è che tutte le componenti di frequenza della waveform in ingresso vengono spostate nel tempo della stessa quantità costante (la pendenza della funzione lineare) [31].

Questa proprietà è fondamentale qualora i segnali vengano analizzati nel dominio del tempo.

Una volta estratto il segmento utile di ciascun segnale è stato valutato il rapporto segnale-rumore (SNR) come indicatore di maggior sensibilità al fenomeno ultrasonoro.

$$SNR = 20 \text{ Log} \frac{[RMS]_{35\mu s}^{160\mu s}}{[RMS]_{25\mu s}^{35\mu s}} \quad (4.2)$$

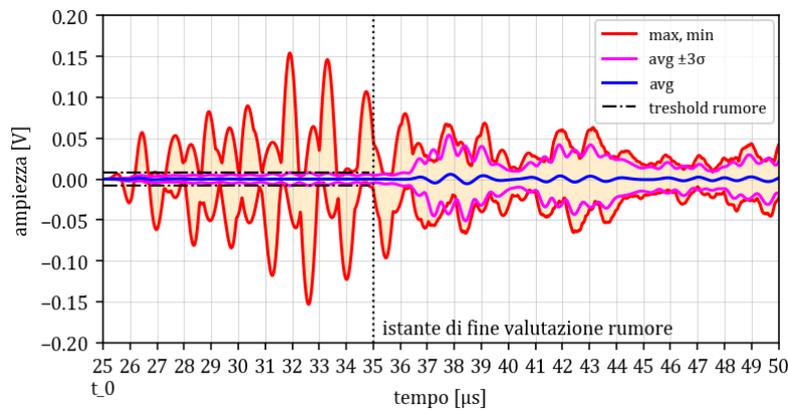


Fig. 23: distribuzione statistica degli andamenti temporali delle waveform

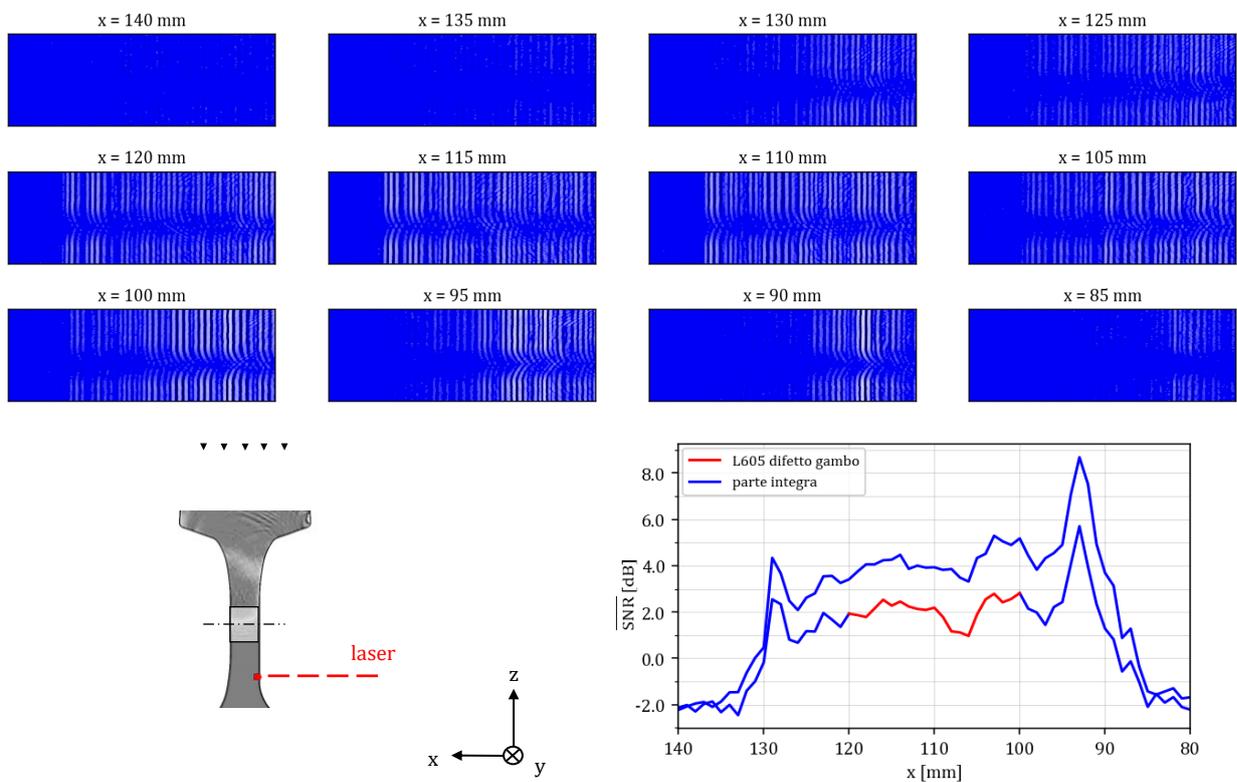


Fig. 24: B-scan ampiezza per L605 difetto gambo, $t \in [25, 160] \mu s$: all'aumentare della coordinata x il segnale si attenua fino al livello del rumore non consentendo di discriminare il foro del componente, anche in una sezione integra.

4. Analisi del segnale

Il rumore è stato valutato osservando il grafico statistico seguente che mette in luce come per $\geq 99\%$ delle waveform il tempo di può essere ritenuto $>35 \mu\text{s}$ e come ci sia una distribuzione costante (nell'ipotesi di distribuzione gaussiana delle ampiezze ad un dato istante di tempo) fino a questo valore, indicando la presenza di rumore con soglia $\text{ths} \approx 7.8 \times 10^{-3} \text{ V}$. Poiché l'intensità acustica di una sorgente puntiforme diminuisce con fattore $1/r^2$, con r distanza dalla sorgente, in base al layout di Fig. 11 si comprende come la maggior parte dell'energia acustica risieda nel volume di campione più prossimo al laser e infatti il grafico del SNR medio valutato sui punti di acquisizione lungo x di una sezione integra conferma questo. Successivamente si è eseguita una STFT (Short Time Fourier Transform) per analizzare se i wavepacket che giungono alla sonda ricevente a istanti diversi hanno contenuto in frequenza distinto, ovvero se il componente è un mezzo dispersivo per la banda di interesse.

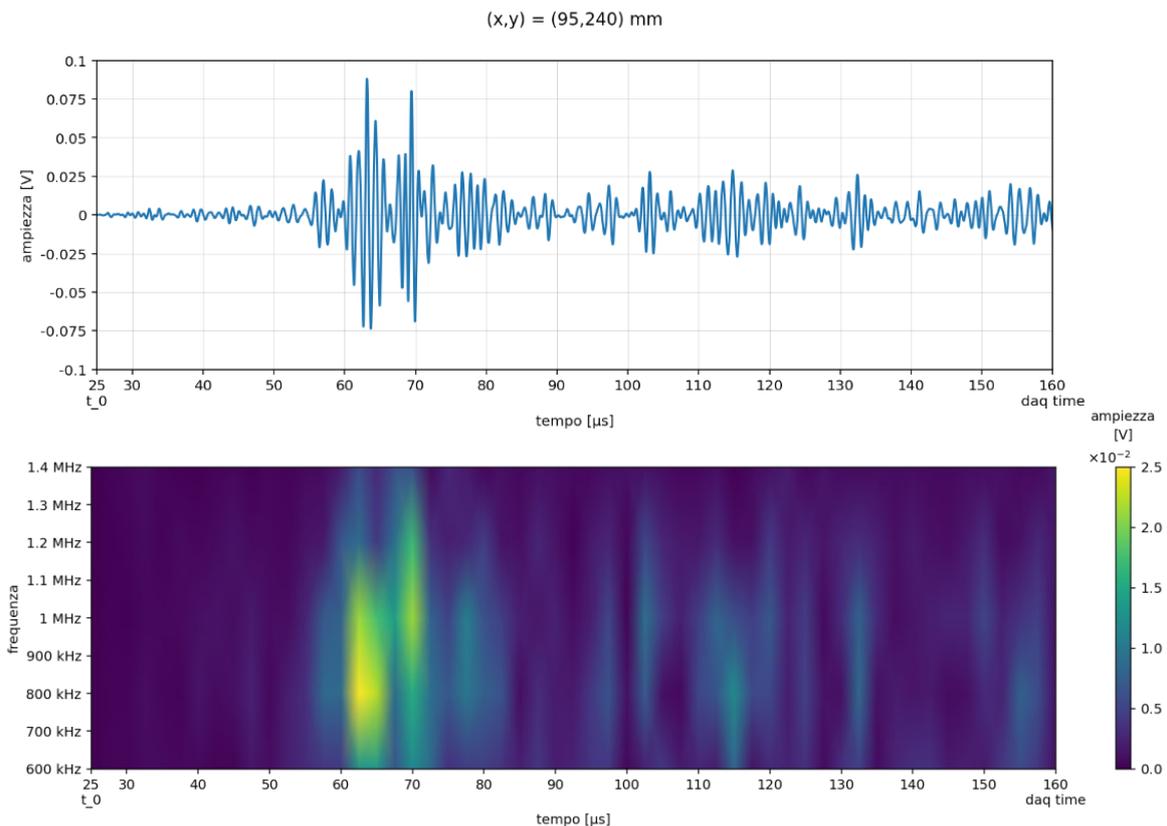


Fig. 25: segnale e relativa STFT ampiezza ottenuta con finestra mobile di Hann, $w = 5 \mu\text{s}$ e 50% overlap

La STFT di Fig. 25 ha una risoluzione nel tempo di $w = 5 \mu\text{s}$ e una in frequenza di 0.2MHz. Si evince come il contenuto in frequenza di wavepacket distinti sia praticamente sovrapposto e ciò non consente di identificare una frequenza di soglia per identificare il tipo di onda dallo spettro del segnale. Questa tecnica sarebbe stata

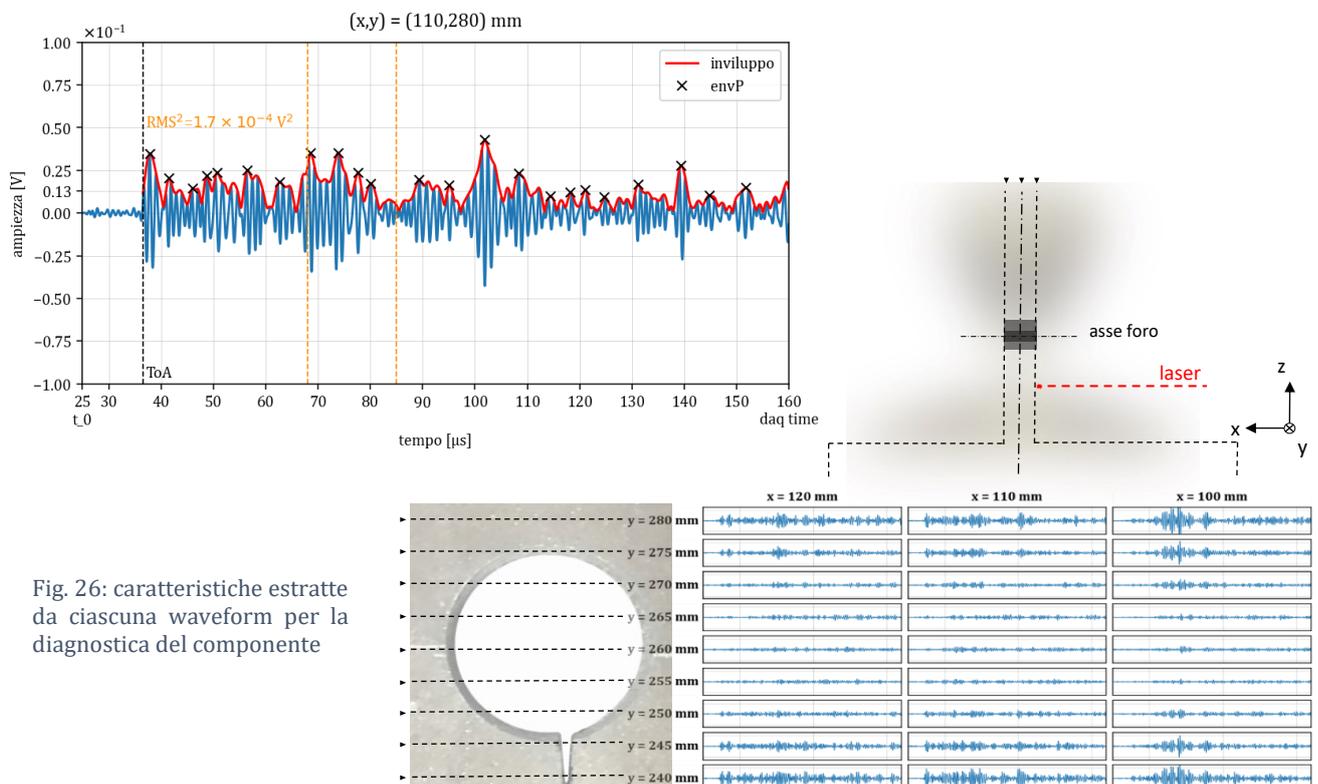
4. Analisi del segnale

utile per poter decomporre il segnale in base al tipo di onda e ricercare informazioni sui difetti superficiali nelle onde S e sui difetti interni attraverso le altre tipologie. È stata quindi condotta una analisi preliminare delle waveform utilizzando le grandezze estraibili dall'andamento temporale, realizzando grafici C-scan.

4.2 C-scan

Le difettosità possono essere evidenziate solo tramite confronto di più A-scan, essendo ciascuna riferita a uno specifico punto di acquisizione (x, y) . Attraverso un grafico di tipo C-scan si va a graficare in funzione della posizione di acquisizione una caratteristica estratta dall'andamento della waveform nel dominio del tempo che permetta di discriminare la difettosità. In tale rappresentazione quest'ultima corrisponderà a una regione in cui c'è una differenza con la regione circostante. Sulla base del confronto a schermo di più waveform (Fig. 26) si possono individuare delle differenze tra zone integre e zone difettate usando questi indicatori estratti dall'andamento nel tempo, analizzati in seguito:

- valore quadratico medio (RMS^2) in un intervallo di tempo costante;
- tempo di arrivo del segnale (Time of Arrival, ToA);
- ampiezza dei massimi dell'involuppo della waveform (envP).



4. Analisi del segnale

4.2.1 Parte integra

Essendo un grafico C-scan basato sulle differenze tra le metriche valutate in punti di acquisizione di sezioni difettate e sezioni integre (in proiezione verticale) occorre definire come considerare il valore dell'indicatore di riferimento. A che distanza minima dal difetto una sezione integra restituisce un segnale di risposta che può essere ritenuto rappresentativo di questa condizione è stabilito valutando la convergenza delle metriche di contrasto, definite ai paragrafi successivi, come esplicitato in Fig. 27. Si può assumere una distanza di estinzione pari a 50 mm dal bordo proiettato della discontinuità in base ai grafici mostrati per il difetto L605 gambo, di dimensioni maggiori e più vicino alla sorgente. Questo riferimento è stato valutato come il valore medio dell'indicatore nei punti di acquisizione più lontani dal rispettivo difetto per ogni mappa C-scan, considerando una regione che include tutte le posizioni x e 10 valori delle posizioni y, per un totale di $61 \times 10 = 610$ valori su cui mediare.

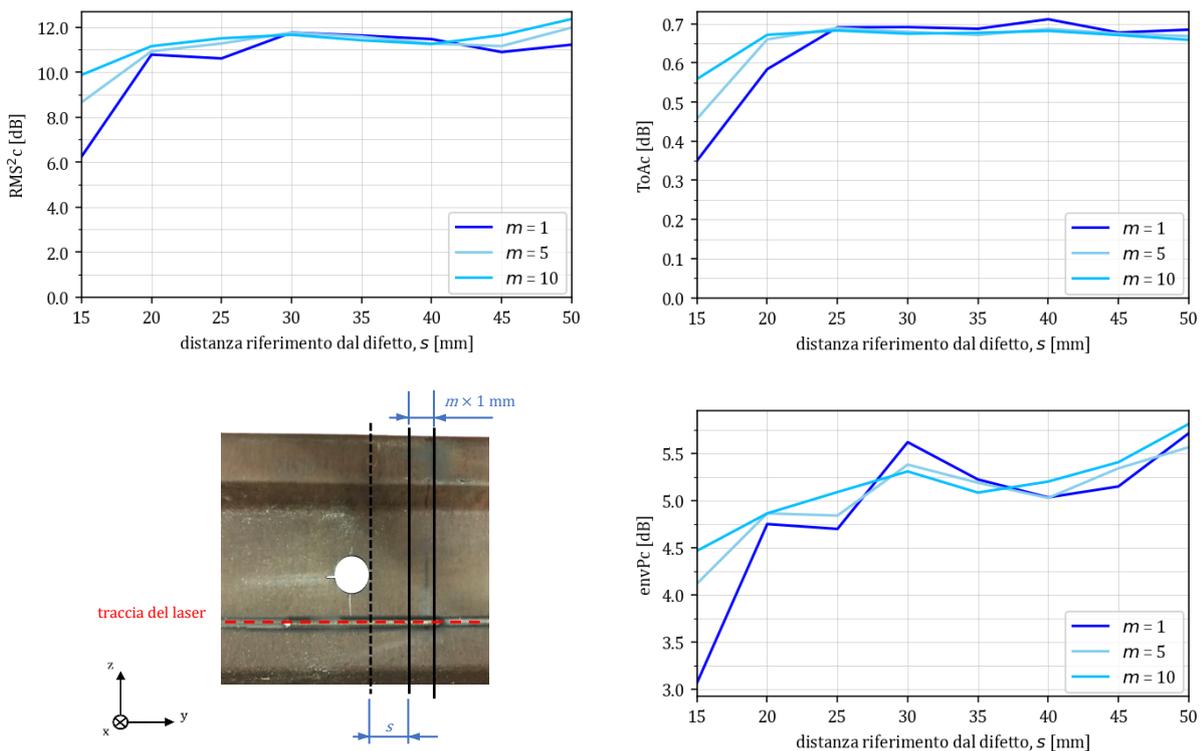


Fig. 27: distanza minima e numero di sezioni da considerare per determinare il riferimento integro con cui valutare la metrica di contrasto.

Lungo l'asse x si devono considerare tutte le posizioni poiché, a parità di y, il valore della metrica estratta è condizionata dalla distanza dalla sorgente laser, sia se si tratta di una grandezza di tempo come ToA, sia una grandezza legata all'energia o

4. Analisi del segnale

all'ampiezza come visto dal rapporto segnale-rumore in Fig. 24. La metrica sarà quindi sensibile alla coordinata x , dato che la distanza dalla sorgente dipende da questo valore, a parità di sezione. Quindi uno stesso difetto situato a x maggiori restituirà un contrasto minore con la parte integra.

4.2.2 Valore RMS^2 in intervallo di tempo costante

Questo indicatore consiste nel valore quadratico del segnale delimitato in un intervallo di tempo definito da $[t_i ; t_i + \delta]$ in μs , costante per tutti i punti di acquisizione di una data scansione (Fig. 28). Se l'intervallo di tempo è costante, questo indicatore è direttamente proporzionale all'energia assorbita dal ricevitore in quella finestra temporale.

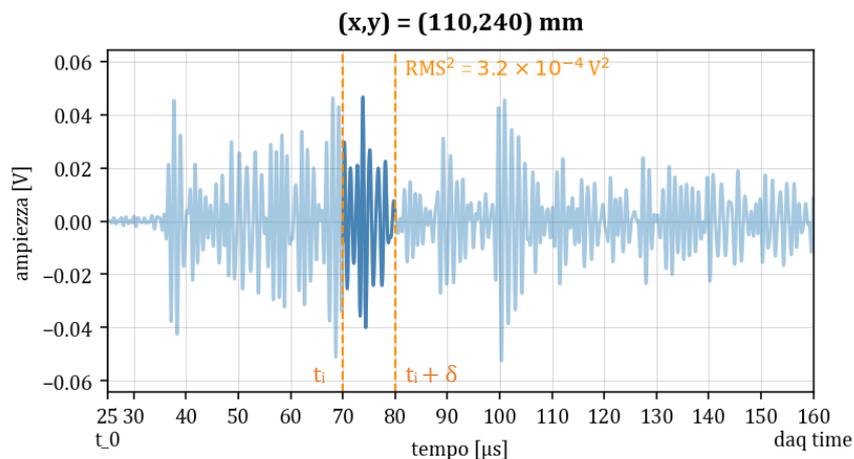


Fig. 28: valore RMS^2 calcolato nel punto di acquisizione $(x,y) = (110,240)$ mm nell'intervallo $[70 \mu s; 80 \mu s]$

Il principio diagnostico di questa grandezza risiede nel fatto che un'onda che ha interagito con una difettosità arriverà alla sonda con una fase e ampiezza diversa rispetto alle onde che arrivano negli stessi istanti nei punti di acquisizione di una sezione integra. Infatti interagendo con il difetto la componente trasmessa verrà attenuata (tramite (2.8)-(2.9) si dimostra che $>99\%$ dell'energia acustica di un'onda piana viene riflessa all'interfaccia acciaio-aria) mentre quella riflessa potrebbe essere amplificata o attenuata a seconda di interferenze costruttive o distruttive che ridistribuiscono il contenuto energetico all'interno del campione. Si può calcolare quindi una immagine C-scan dove ogni coordinata (x,y) è associata ad un valore RMS^2 . L'intervallo di tempo $[t_i ; t_i + \delta]$ su cui calcolare il valore efficace è da determinare in modo che la metrica di contrasto sull'immagine risultante risulti massima. Di seguito si presenta una tabella con i grafici C-scan RMS^2 per le diverse difettosità.

4. Analisi del segnale

La metrica di contrasto usata è quindi:

$$\text{RMS}^2_c = 10 \left| \text{Log} \frac{\text{avg}_{(x,y) \in P_{\text{int}}} [\text{RMS}^2]_{t_i}^{t_i+\delta}}{\text{avg}_{(x,y) \in \text{RoI}} [\text{RMS}^2]_{t_i}^{t_i+\delta}} \right| \quad (4.3)$$

con P_{int} parte integra di riferimento e RoI (Region of Interest) parte dell'immagine C-scan corrispondente alla proiezione della difettosità sul piano di acquisizione (o sezioni interessate nel caso il difetto fosse esterno come i difetti alla base dei campioni). Tanto più il valore di questa metrica tenderà a 0 tanto più l'immagine C-scan relativa al RMS^2 apparirà omogenea, senza quindi evidenziare difettosità nelle sezioni.

Il valore superiore della scala di graduazione è stato fissato considerando la statistica delle ampiezze dei massimi nel segnale per tutte le acquisizioni, mostrata in figura:

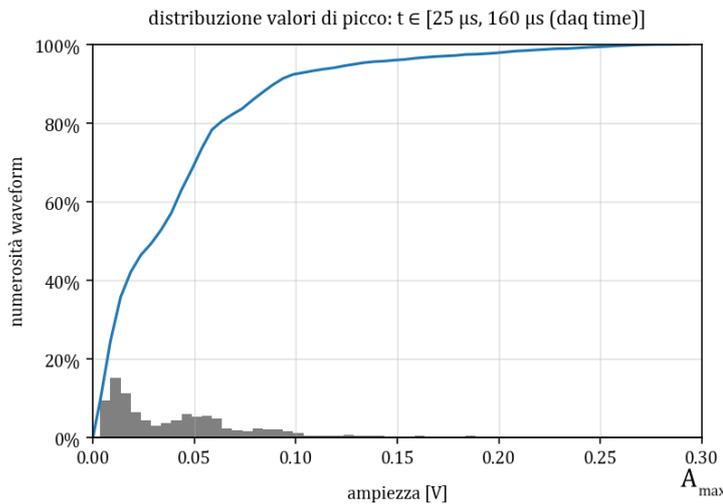


Fig. 29: statistica ampiezze dei massimi delle waveform di tutte le acquisizioni

Calcolato un fattore di cresta medio dei segnali pari a $\overline{FC} \approx 6.8$, il valore massimo RMS^2 ($\approx 99\%$ delle waveform hanno un valore inferiore) si stima attraverso:

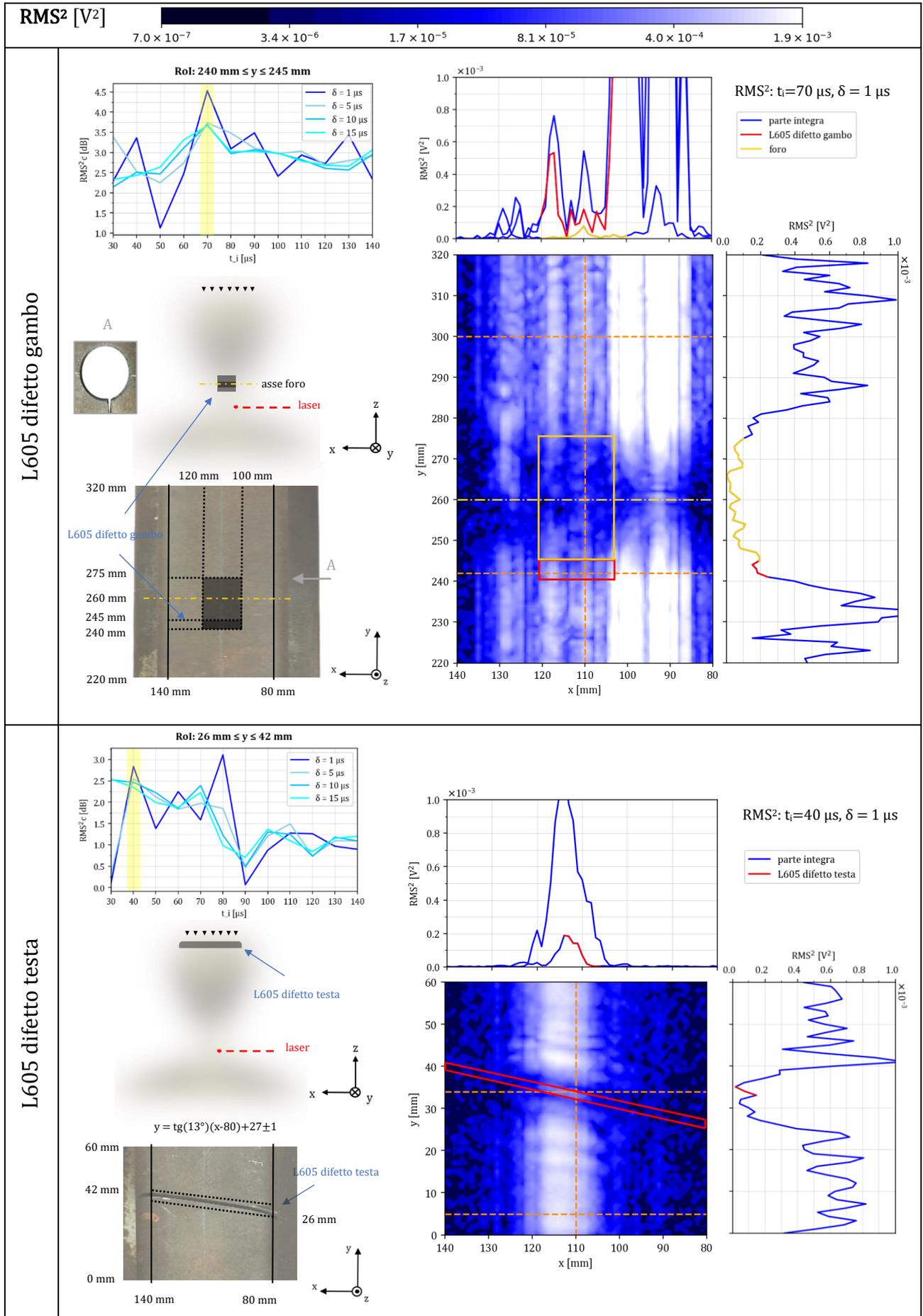
$$\text{RMS}^2_{\text{max}} \approx \frac{A_{\text{max}}^2}{\overline{FC}^2} \quad (4.4)$$

un valore $\text{RMS}^2_{\text{max}} \approx 1.94 \times 10^{-3} \text{ V}^2$.

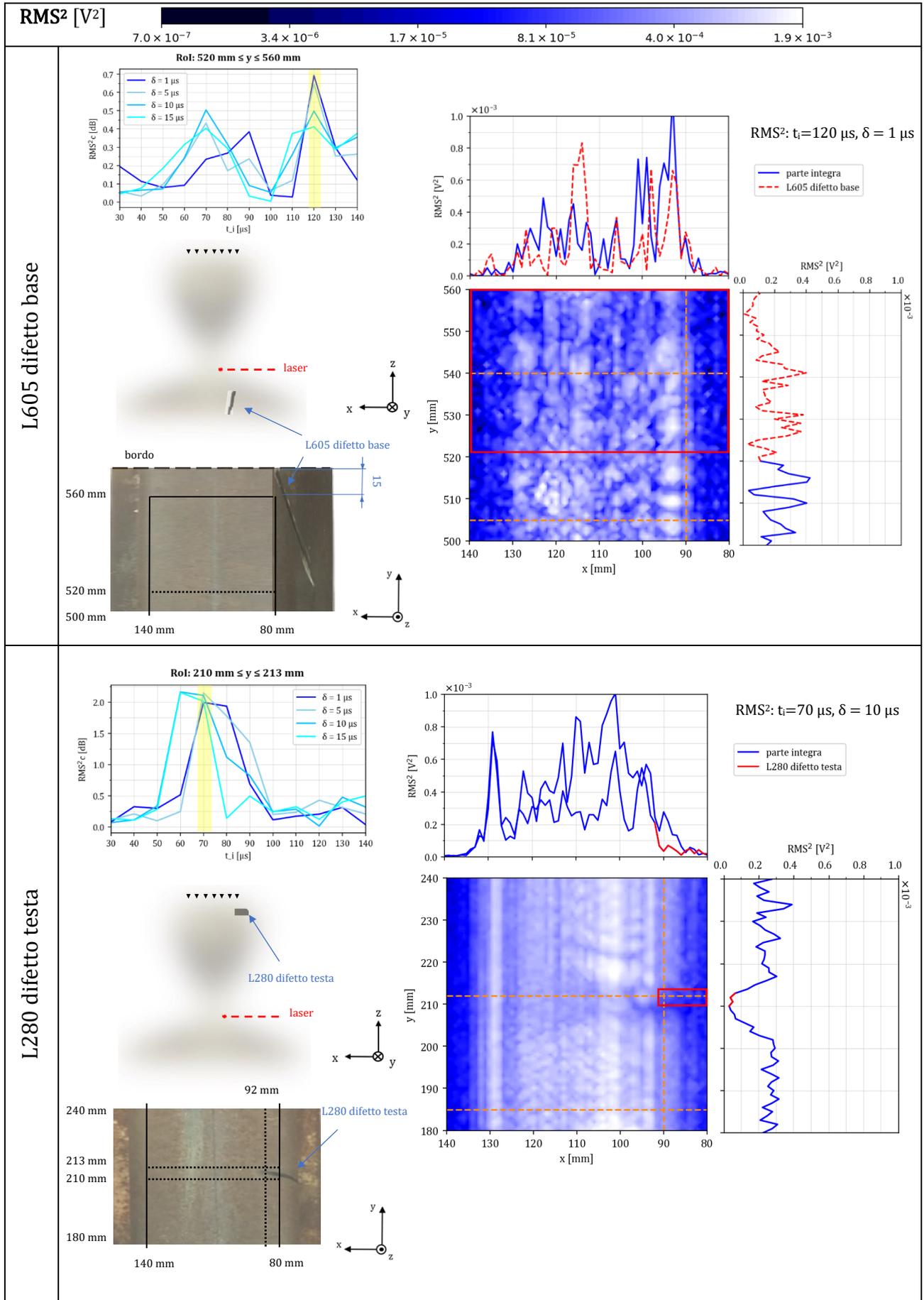
Di seguito si riportano i risultati ottenuti utilizzando questo indicatore.

La superficie di acquisizione non si estende fino al bordo del componente per motivi di sicurezza legati all'impulso laser, che potrebbe fuoriuscire dal campione.

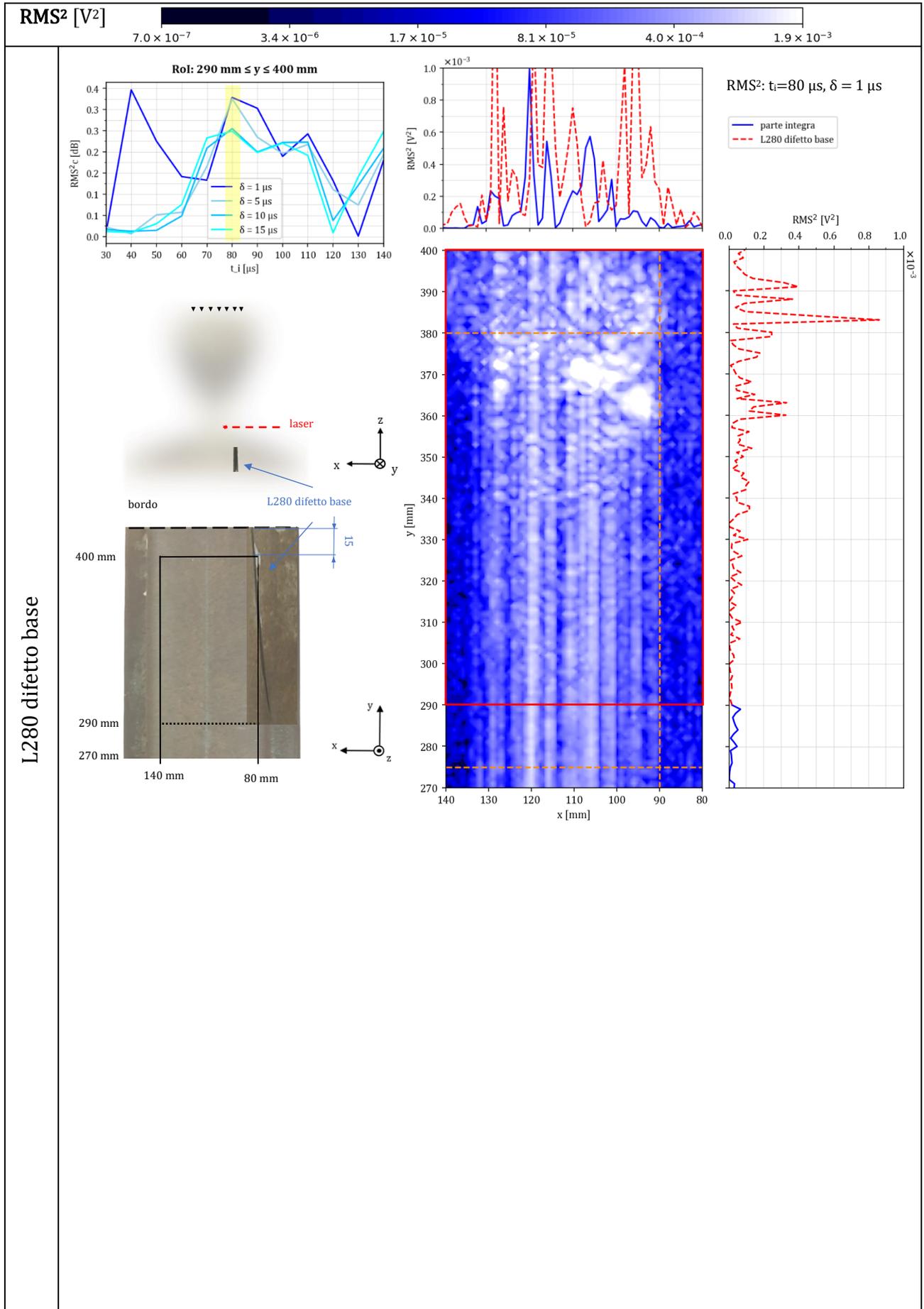
4. Analisi del segnale



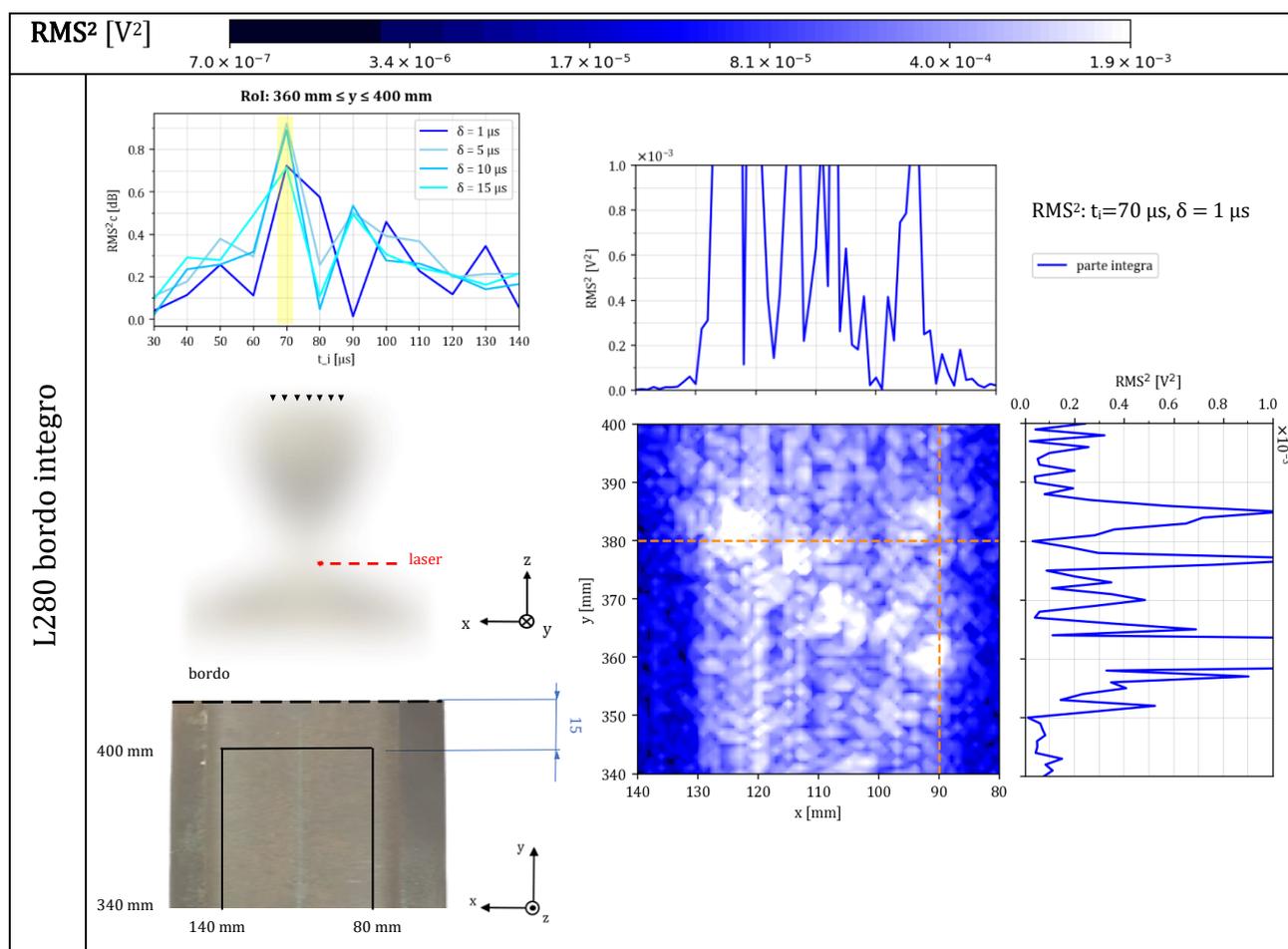
4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



Tab. 8: C-scan RMS^2 , le linee rosse tratteggiate indicano un difetto che non ha una proiezione sulla superficie di acquisizione

I risultati ottenuti sono sintetizzati nel valore massimo RMS^2c riportato in tabella finale. Dai grafici C-scan risulta:

- una dipendenza lungo x dell'indicatore RMS^2 anche per sezioni integre, causata dalla asimmetria della posizione della sorgente laser
- la dimensione apparente di una difettosità sulla superficie di acquisizione è maggiore della sua reale proiezione geometrica x - y , come evidenziato dal confronto con i rettangoli in figura. L'estensione che viene rilevata attraverso gli ultrasuoni è tanto più prossima a quella reale della difettosità tanto più questa sarà vicina alla superficie di acquisizione. Questo è dovuto alle rifrazioni e riflessioni che si verificano alle superfici delle difettosità, sufficientemente intense da condizionare il segnale anche in punti di acquisizione più lontani. Difettosità prossime ad altre interfacce come l'intaglio rispetto al foro centrale sono mascherate dall'effetto di quest'ultime e non sono rilevabili.

4. Analisi del segnale

- L'indicatore energetico non permette di discriminare difettosità al bordo del campione, come i difetti alla base, il cui effetto è mascherato dalle riflessioni che si verificano al confine del componente

4.2.3 Tempo di arrivo (ToA)

Il tempo di arrivo è definito come l'istante di tempo in cui la waveform acquisita supera un valore di ampiezza di soglia $t_{sh} \approx 7.8 \times 10^{-3} \text{ V}$ calcolato sulla base dell'andamento statistico nel tempo, come mostrato in Fig. 23.

Questo indicatore diagnostico si basa sul principio secondo cui le onde che attraversano le difettosità raggiungono la sonda ricevente con un tempo diverso a parità di distanza geometrica poiché la velocità di propagazione dell'aria è minore della velocità di propagazione dell'acciaio o comunque perché le onde vengono rifratte e percorrono un cammino diverso.

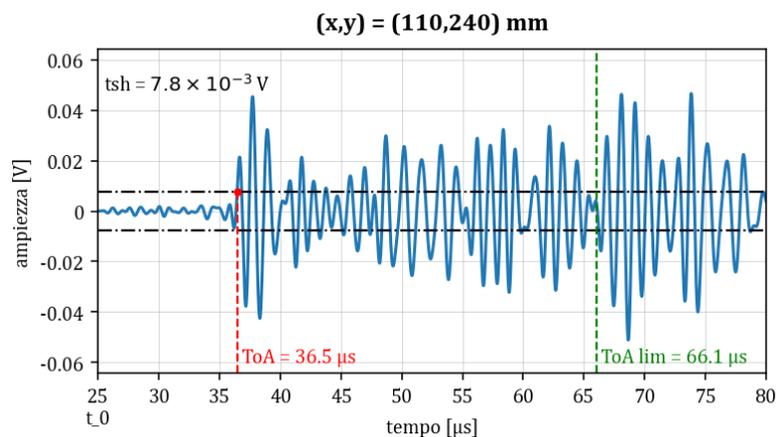


Fig. 30: tempo di arrivo calcolato per una waveform

La sogliatura è l'operazione più semplice per separare segnale da rumore, tuttavia, è spesso approssimativa e non consente di individuare correttamente il tempo di arrivo se l'intera waveform è al di sotto di tale valore. Per correggere in parte tale effetto è stata usata una soglia adattativa che ricorsivamente diminuisce del 99% finché non determina un istante di tempo. Per evitare che il valore determinato appartenga a un intervallo di tempo considerato inaccettabile fisicamente si limita superiormente il tempo di arrivo con un $ToA \text{ lim}$, calcolato con il semplice modello deterministico in Fig. 31, basato sull'arrivo di onde S in quanto più lente:

$$ToA_{\text{lim}}(x) = \frac{70 \text{ mm} + x}{v_S} + \frac{d}{v_0} \quad (4.5)$$

4. Analisi del segnale

con $v_s = 5.85 \text{ mm}/\mu\text{s}$ (Tab. 3), $v_0 = 0.34 \text{ mm}/\mu\text{s}$ velocità di propagazione del suono in aria, $d \approx 2 \text{ mm}$ distanza sonda-campione e 70 mm è una costante legata al percorso d'onda mostrato in figura sottostante:

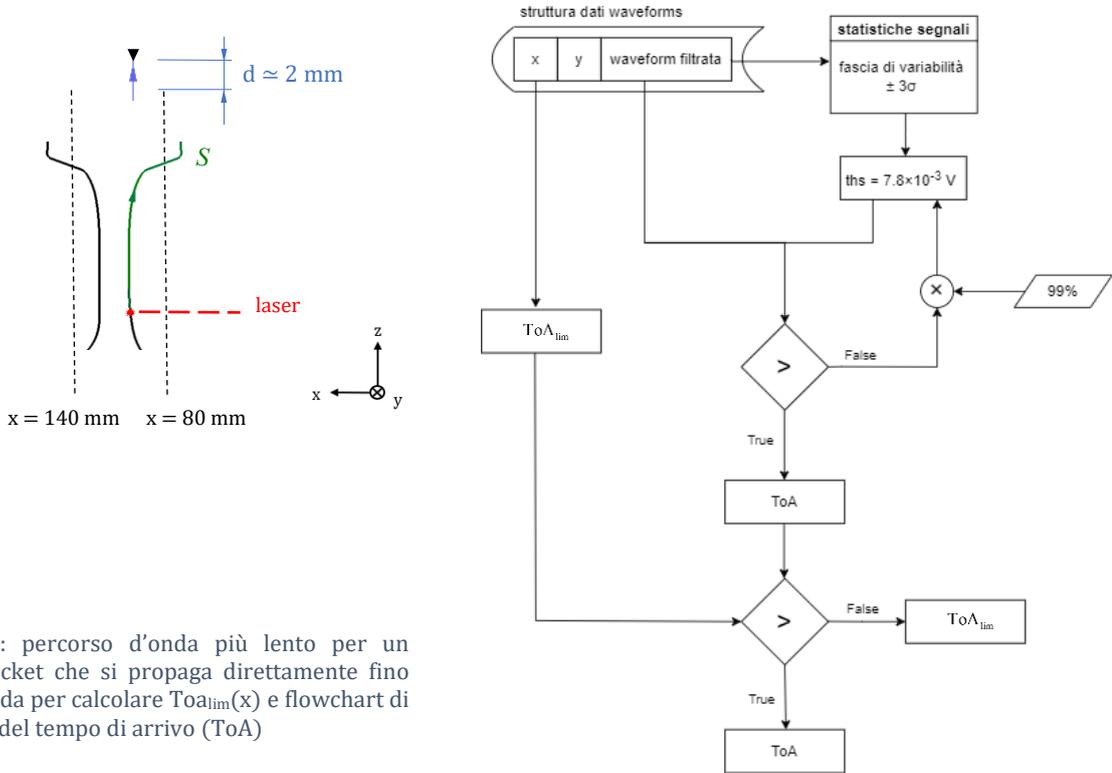


Fig. 31: percorso d'onda più lento per un wavepacket che si propaga direttamente fino alla sonda per calcolare $ToA_{lim}(x)$ e flowchart di calcolo del tempo di arrivo (ToA)

Questo indicatore permette di discriminare le difettosità in base alle onde dirette, ovvero quelle onde che si propagano dalla sorgente alla sonda con i cammini più brevi. Quindi non permette di individuare i difetti alla base del componente che poiché trovandosi al di sotto della linea del laser nel setup utilizzato possono essere individuati solo nei wavepacket che giungono a istanti di tempo superiori. Tuttavia teoricamente può risolvere con un contrasto migliore le difettosità più vicine alla superficie di acquisizione.

La metrica di contrasto usata è quindi:

$$ToAc = 10 \left| \text{Log} \frac{\text{avg } ToA_{(x,y) \in P_{int}}}{\text{avg } ToA_{(x,y) \in RoI}} \right| \quad (4.6)$$

Tanto più il valore di questa metrica tenderà a 0 tanto più l'immagine C-scan relativa al ToA apparirà omogenea, senza quindi evidenziare difettosità nelle sezioni.

4. Analisi del segnale

con P_{int} parte integra di riferimento e ROI (Region of Interest) parte dell'immagine C-scan corrispondente alla proiezione della difettosità sul piano di acquisizione (o sezioni interessate nel caso il difetto fosse esterno come i difetti alla base dei campioni). Il valore superiore della scala di graduazione è stato fissato considerando la distribuzione statistica dei tempi di arrivo per tutte le acquisizioni, mostrata in figura:

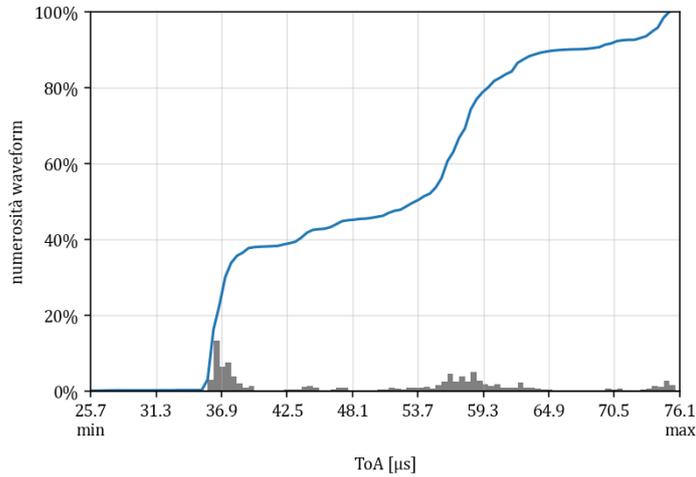
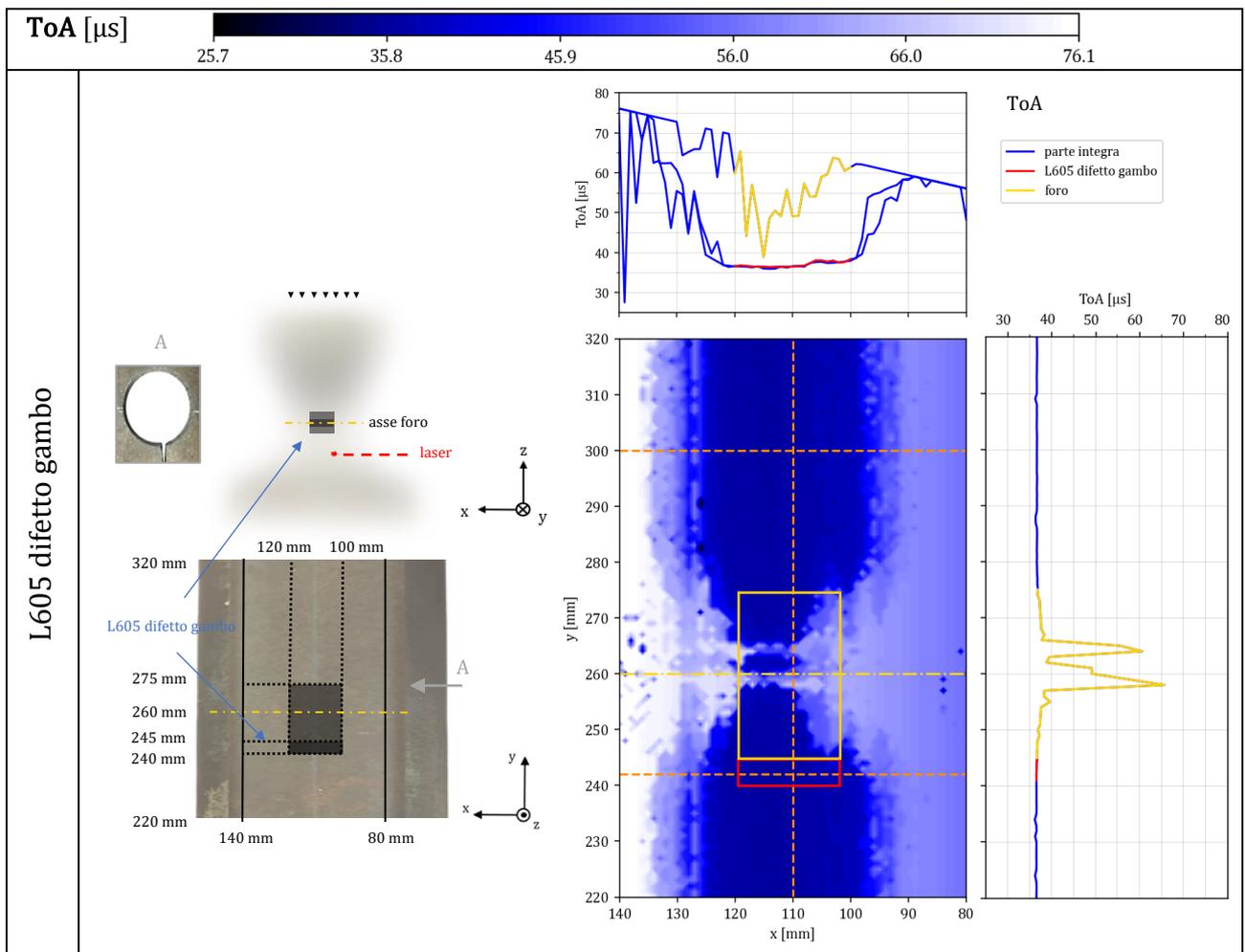
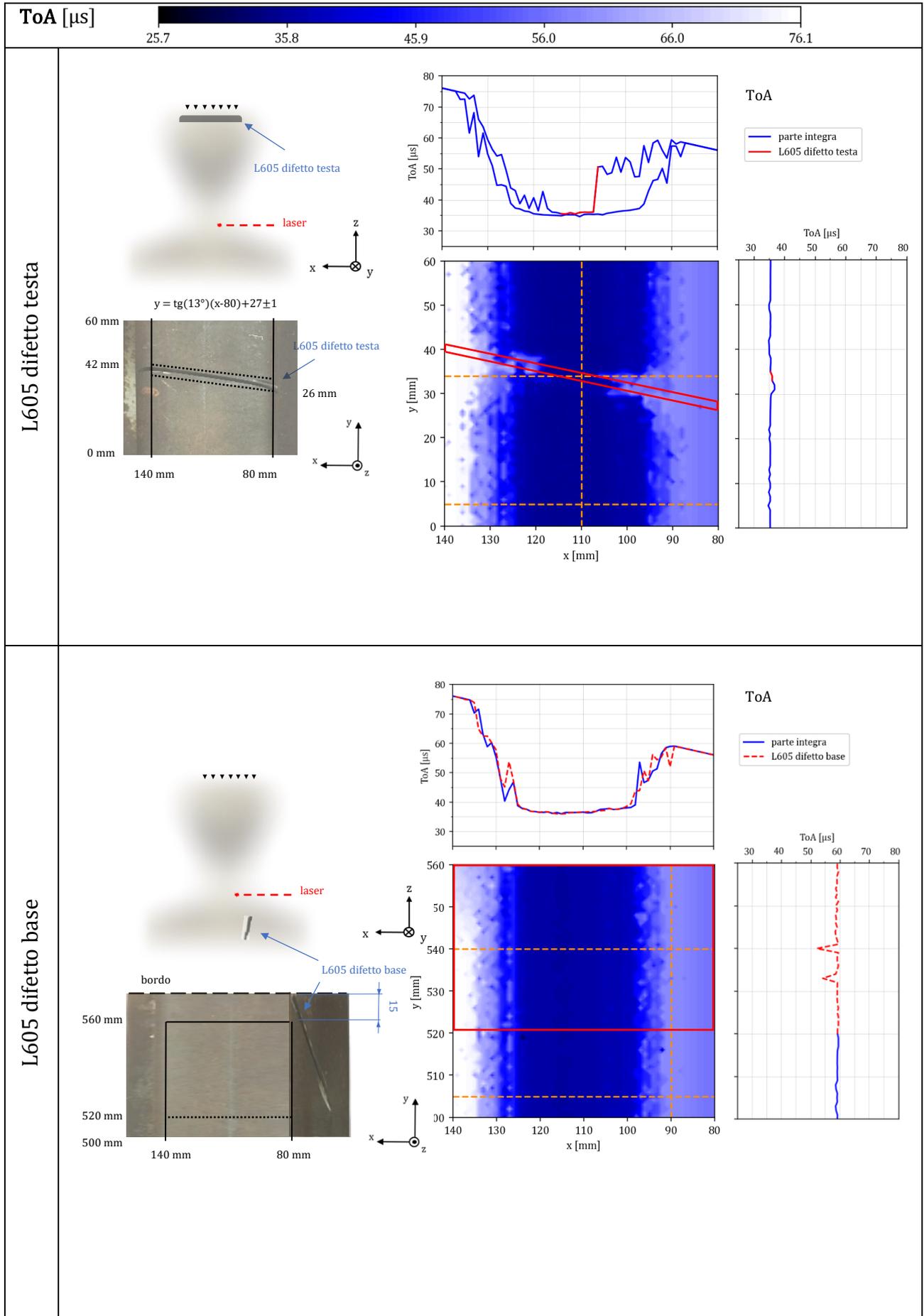


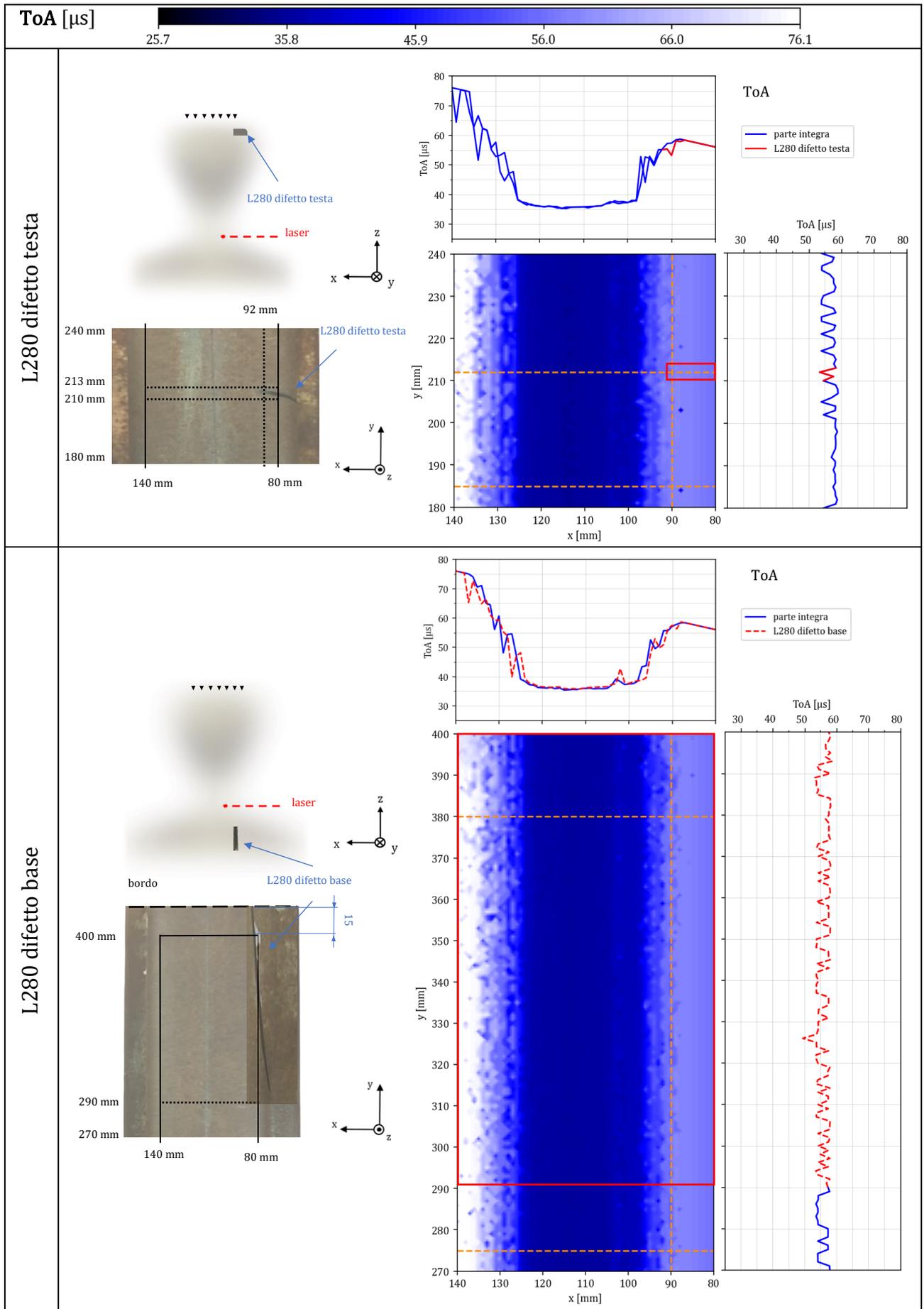
Fig. 32: statistica ToA delle waveform di tutte le acquisizioni



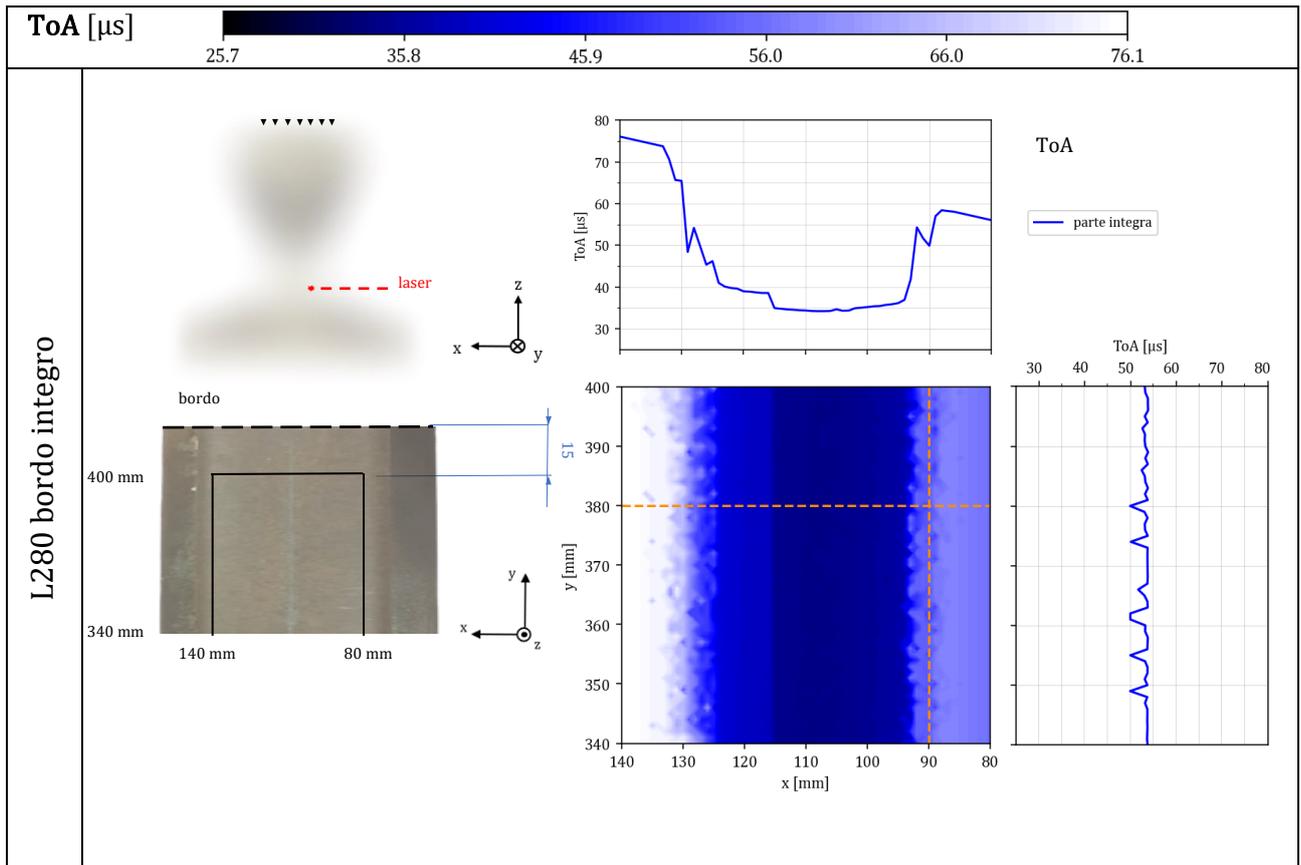
4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



Tab. 9: C-scan ToA, le linee rosse tratteggiate indicano un difetto che non ha una proiezione sulla superficie di acquisizione

I risultati ottenuti sono sintetizzati nel valore massimo ToAc riportato in tabella finale. A differenza del valore RMS2, il ToA si mantiene pressoché costante nella zona centrale del componente ($100 \text{ mm} < x < 120 \text{ mm}$) mentre l'andamento del primo diminuisce all'aumentare di x . Dai grafici C-scan:

- vengono rilevati soltanto i difetti che si trovano nella parte centrale del componente, ovvero L605 difetto testa e il foro centrale. Ciò significa che la posizione centrale è attraversata dalla maggior parte delle onde dirette. Risulta anche in questo caso mascherato il difetto L605 difetto gambo da altre onde che impiegano meno tempo a propagarsi fino alla superficie sensibile della sonda;
- la dimensione apparente di una difettosità sulla superficie di acquisizione è in questo caso minore della sua reale proiezione geometrica x - y , come evidenziato dal confronto con i rettangoli in figura. Questo è dovuto a un mascheramento di onde dirette che anticipano le onde che si propagano nella difettosità, a velocità di propagazione minore e con un diverso cammino d'onda;
- le difettosità al di sotto della linea del laser non sono rilevate.

4. Analisi del segnale

4.2.4 Massimi dell'involuppo (envP)

L'involuppo del segnale permette di estrarne la sua modulante, legata alla forma della waveform (Fig. 33).

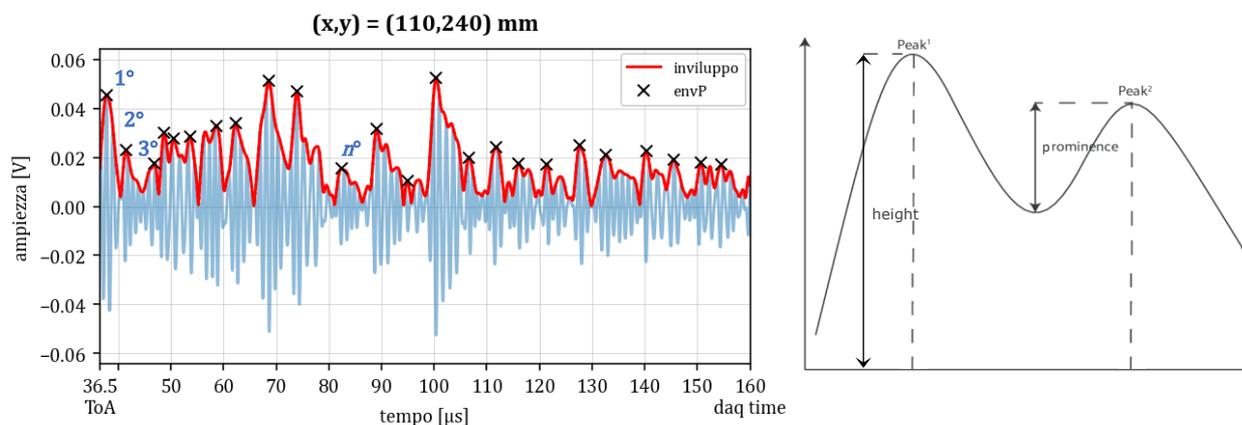
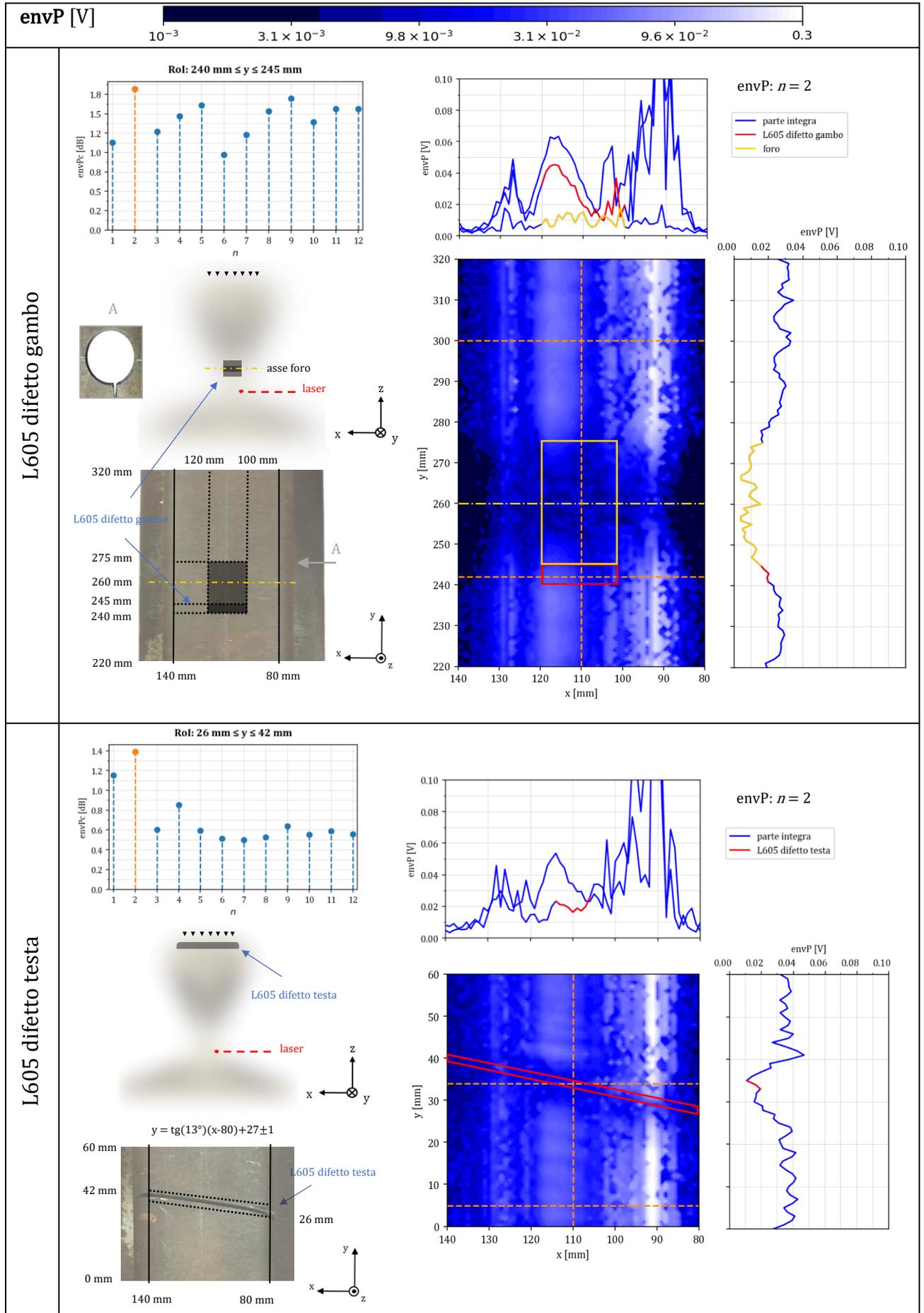


Fig. 33: involuppo di una waveform e parametri di picco [35]

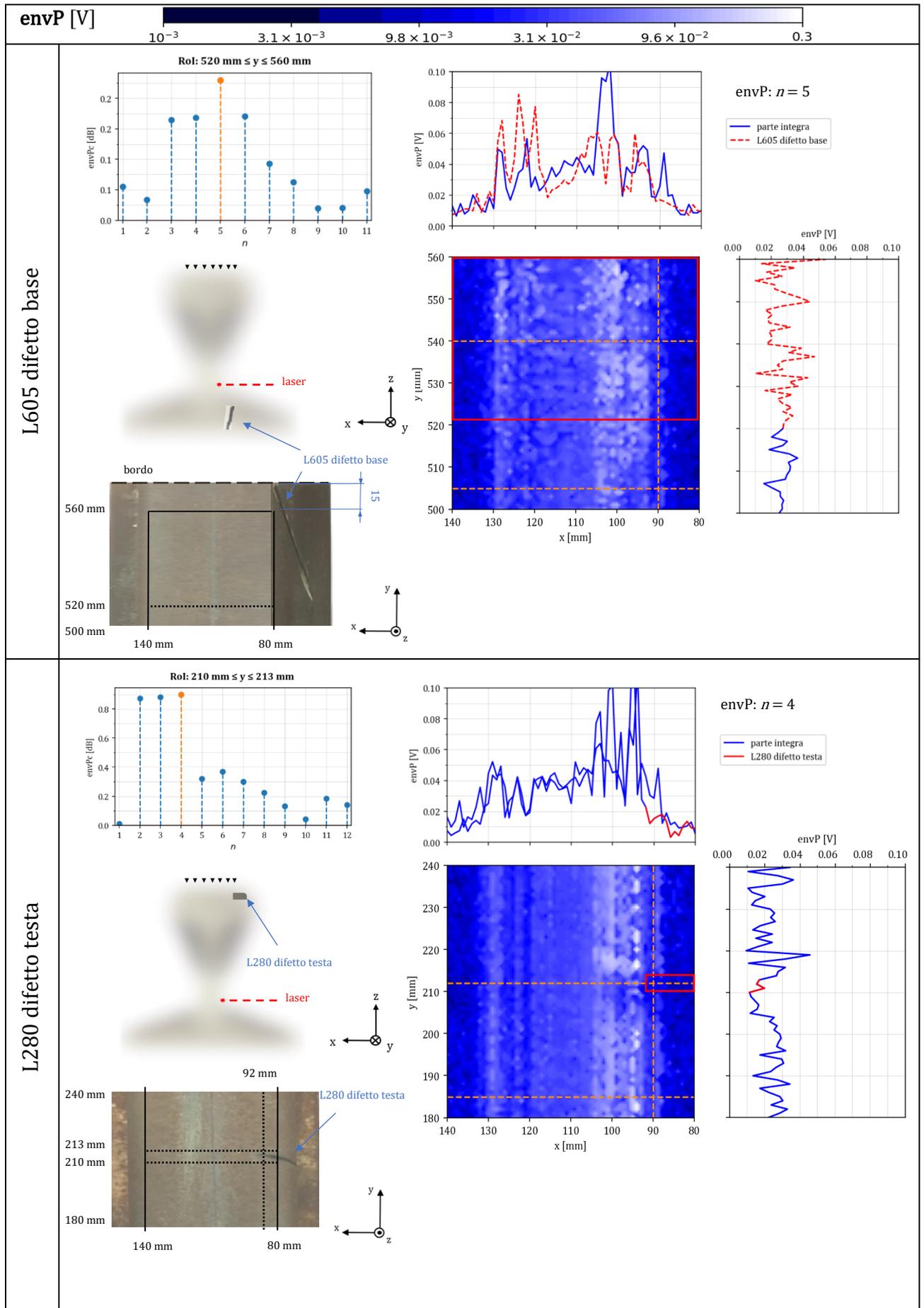
Il treno di wavepacket che la compongono sarà più o meno intenso a seconda se l'ultrasuono ha intercettato difettosità lungo le direzioni di propagazione. Infatti qualora si verificano fenomeni di riflessione e rifrazione alle interfacce con le difettosità sarebbero prodotti cammini d'onda distinti, rilevabile come uno sfasamento della waveform rispetto a quella associata a una zona integra. Nei punti di acquisizione interessati dalla difettosità sarebbero quindi acquisite ampiezze della modulante diverse. Ordinando i wavepacket in base al loro istante di arrivo e mappandone i massimi relativi (peak) su un C-scan, per ciascun numero ordinale della successione, si può ottenere una zona di contrasto rispetto alla zona integra che indica la presenza di difettosità. Questo indicatore permette di valutare il contrasto in termini di ampiezza [V], esauendo il tipo di grandezze che possono essere calcolate su un andamento waveform, dopo tempo di arrivo [μ s] e valore dell'energia sottesa (proporzionale a RMS^2 [V^2]). I massimi relativi sono calcolati con un algoritmo di peak finding impostando due parametri, height e prominence (mostrati in Fig. 33), a un valore di soglia proporzionale al valor medio dell'involuppo per filtrare le oscillazioni minori. In analogia alle precedenti, la metrica utilizzata è:

$$envPc = 10 \left| \text{Log} \frac{\text{avg}_{(x;y) \in P_{int}} envP(n)}{\text{avg}_{(x;y) \in RoI} envP(n)} \right| \quad (4.7)$$

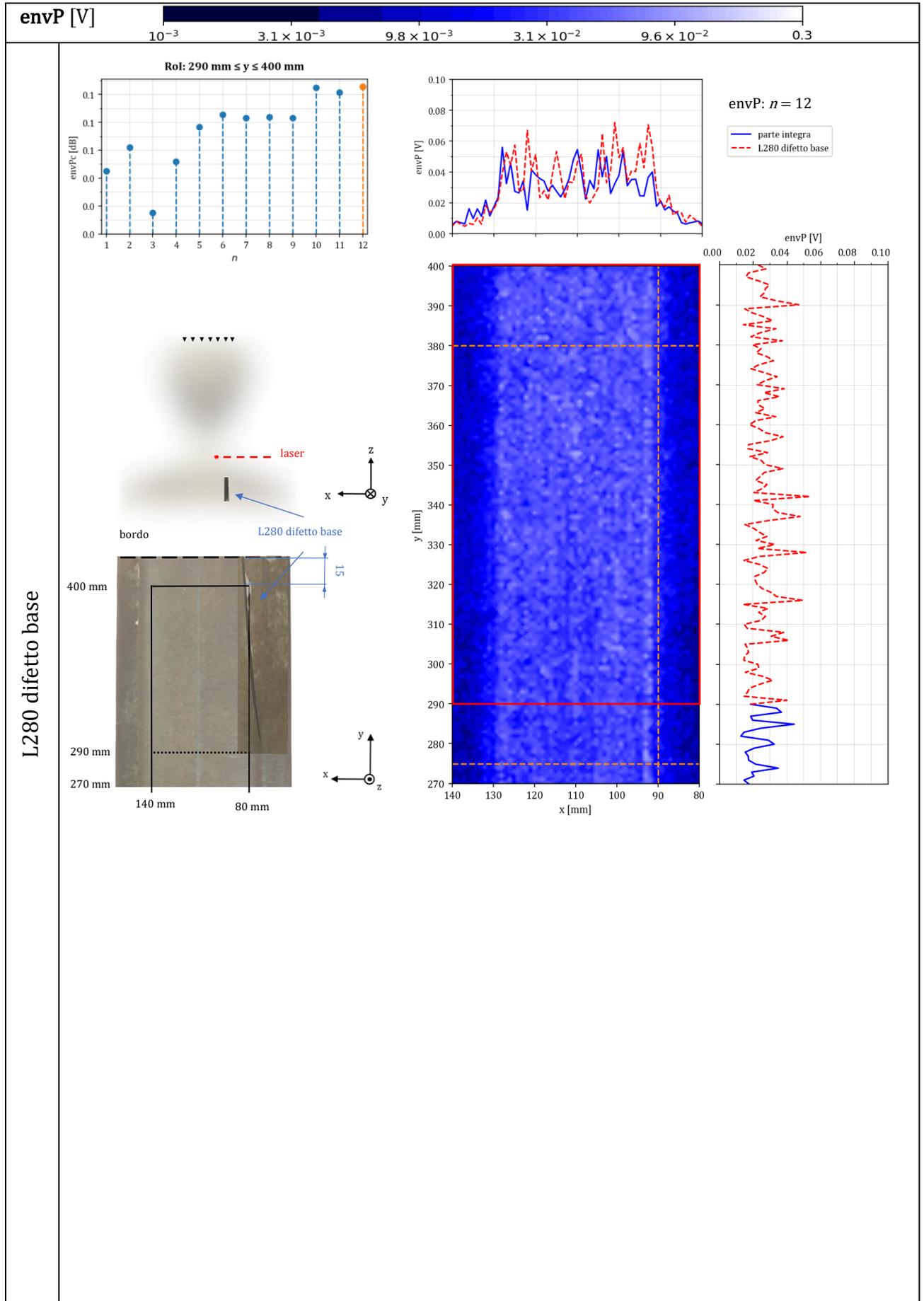
4. Analisi del segnale



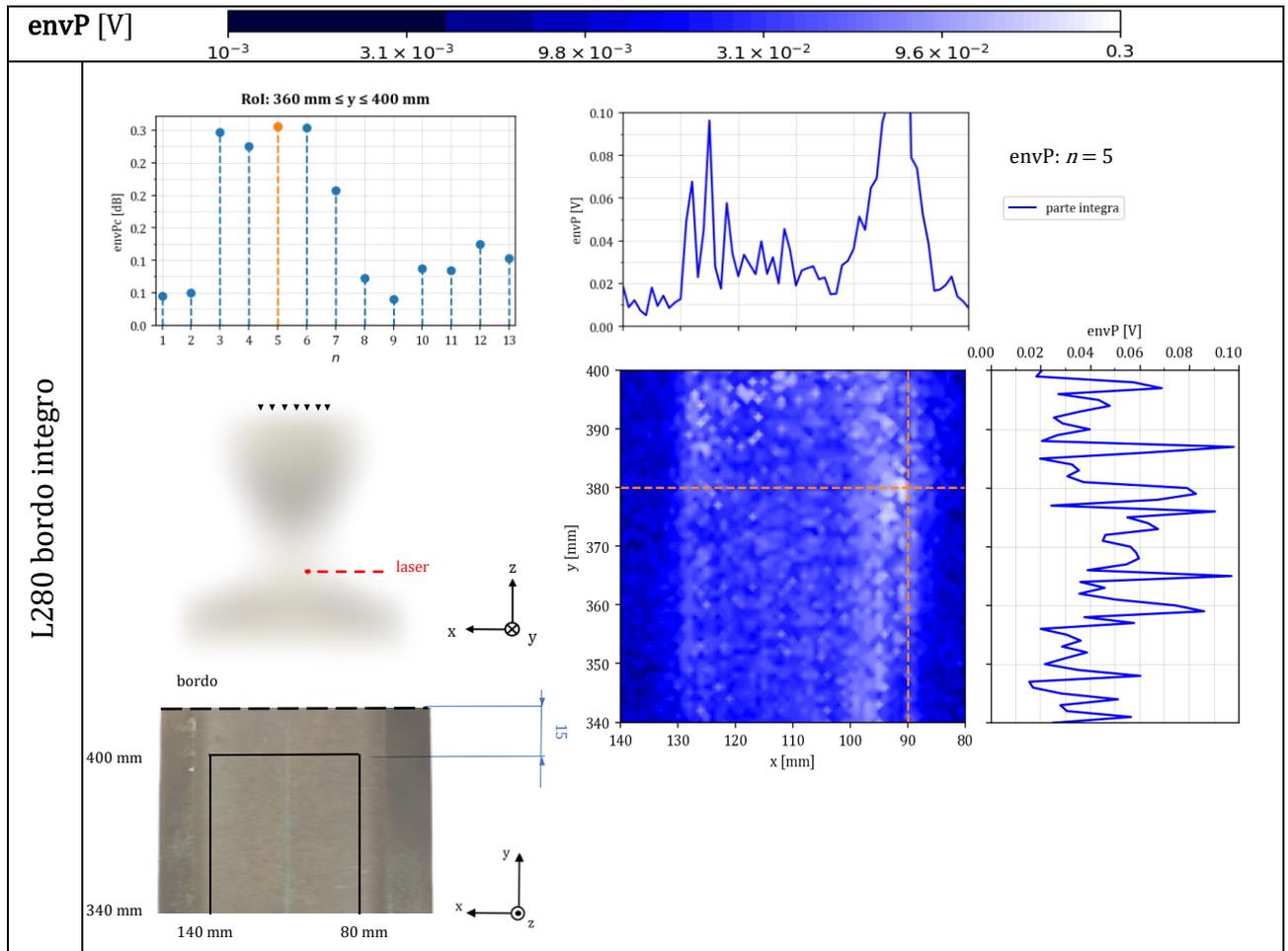
4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



4. Analisi del segnale



Tab. 10: C-scan envP, le linee rosse tratteggiate indicano un difetto che non ha una proiezione sulla superficie di acquisizione

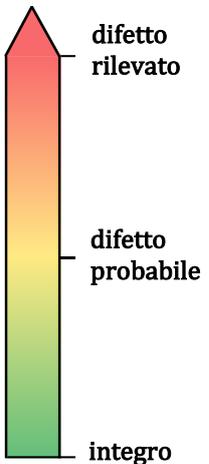
I C-scan di questa metrica risultano maggiormente affetti da rumore, come dimostra lo speckle nelle immagini C-scan soprastanti, rivelando come i picchi della waveform siano soggetti a più aleatorietà, riconducibile principalmente all'instabilità del laser descritta nel paragrafo 3.2.1.

4. Analisi del segnale

4.2.5 Confronto C-scan

Di seguito si riportano i valori massimi delle metriche di contrasto ottenuti:

RoI	RMS ² c [dB]	ToAc [dB]	envPc [dB]
L605 difetto gambo	4.5	0.1	1.8
L605 foro	12.4	0.7	5.5
L605 difetto testa	2.8	0.2	1.4
L605 difetto base	0.7	0.0	0.2
L280 difetto testa	2.1	0.0	0.9
L280 difetto base	0.3	0.0	0.1
L280 bordo integro	0.6	0.0	0.3



Tab. 11: confronto sensibilità al difetto delle metriche C-scan analizzate

Con “difetto rilevato” si intende che il valore della metrica di contrasto è ≥ 10 dB, ovvero la zona integra e la RoI assumono valori distanti un ordine di grandezza.

Dalla Tab. 11 si evince che:

- I valori di envP e di RMS² appaiono correlati per via del significativo fattore di cresta medio $\overline{FC} \approx 6.8$ (4.4), nonostante le metriche non siano state valutate negli stessi intervalli di tempo delle waveform;
- il tempo di arrivo si rivela un pessimo discriminante per le difettosità;
- l'indicatore più sensibile è il valore quadratico medio, dimostrando come il quantitativo di energia trasmesso alla sonda da parte delle onde ultrasonore che attraversano la difettosità sia nettamente inferiore rispetto a quello trasportato dalle waveform che si propagano nel materiale integro;
- il foro, la discontinuità più grande all'interno del materiale, è quella maggiormente rilevabile da tutte e tre le metriche e l'intaglio adiacente raggiunge un valor elevato di contrasto per via della presenza del foro che maschera la sua presenza come visto nel relativo grafico di Tab. 8;
- i difetti sulla testa del campione danno un set di punteggi confrontabili come dimostra il fatto che hanno dimensioni circa uguale in spessore;
- come era lecito aspettarsi, le difettosità risultano tanto più evidenziate rispetto al materiale integro tanto più sono prossime alla superficie di acquisizione e maggiori sono le loro dimensioni, per via della complessa interazione tra le onde

4. Analisi del segnale

all'interno del materiale che si verifica anche in sezioni integre per via dei bordi curvilinei del campione;

- non vi è modo di discriminare eventuali sezioni in cui è presente un difetto alla base se questo è situato nelle vicinanze di un bordo del componente.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Il sistema diagnostico illustrato utilizza il segnale ultrasonoro captato da una sonda piezoelettrica senza contatto in aria e generato mediante un impulso laser Q-switched sulla superficie del componente in acciaio sotto ispezione. A differenza dei sistemi di controllo qualità non distruttivo basati su sonda generatore, sonda ricevitore e campione interposto a un mezzo accoppiante, i sistemi laser-ultrasonics permettono di eseguire scansioni senza contatto con il componente. Inoltre si generano onde ultrasonore secondo un diagramma polare di emissione più largo di quello di una sonda generatore, con componenti anche superficiali, permettendo una scansione di geometrie complesse senza cambiare la posizione della sorgente.

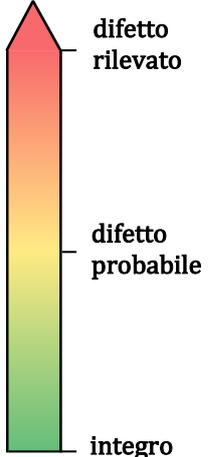
Il laser utilizzato in generazione è di tipo Nd:YAG Q-switched con durata dell'impulso ≈ 7 ns. La sonda piezoelettrica in ricezione ha una frequenza centrale di risonanza a 1MHz ed è stata posta a ≈ 2 mm di distanza dalla superficie del campione. La modalità di acquisizione utilizzata è di tipo punto-punto con assi del laser e della sonda complanari.

Acquisite le waveform di risposta del campione, il segnale è stato estrapolato troncando il transitorio elettrico della sonda dal periodo di acquisizione e applicando un filtro Butterworth passabanda. Per osservare come appaiono le difettosità sulla superficie di acquisizione sono stati realizzati grafici C-scan, dove gli assi corrispondono alla direzione di scansione. Le grandezze mappate nei C-scan sono il valore quadratico medio in un intervallo temporale specificato del periodo di acquisizione (RMS^2), il tempo di arrivo della prima onda diretta con ampiezza superiore a un valore di soglia (ToA) e l'ampiezza massima a un dato indice della successione dei wavepacket che compongono l'involuppo di ciascuna waveform (envP). Per ciascuna metrica è stato quindi calcolato un valore del contrasto d'immagine presente tra punti di acquisizione relativi a sezioni danneggiate e quelli di sezioni integre. I risultati sono mostrati in tabella a pagina seguente.

Nei C-scan RMS^2 e envP quello che emerge è un miglior rilevamento della difettosità quando è situata in prossimità della superficie illuminata per via del maggior rapporto SNR nei punti di acquisizione più vicini alla sorgente. Ciò è stato osservato anche in letteratura ^[12]. Di seguito si riporta il grafico della sensibilità delle metriche ai difetti.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

RoI	RMS ² c [dB]	ToAc [dB]	envPc [dB]
L605 difetto gambo	4.5	0.1	1.8
L605 foro	12.4	0.7	5.5
L605 difetto testa	2.8	0.2	1.4
L605 difetto base	0.7	0.0	0.2
L280 difetto testa	2.1	0.0	0.9
L280 difetto base	0.3	0.0	0.1
L280 bordo integro	0.6	0.0	0.3



RMS² e envP sono due metriche risultate troppo correlate da usare in modo complementare per diagnosticare la presenza di intagli, per via del treno di impulsi che caratterizza l'andamento di una waveform (la gran parte del valore RMS è determinata dall'impulso registrando un fattore di cresta medio ≈ 6.8). La metrica da preferire è il valore quadratico medio, risultato con i maggiori livelli di contrasto per ogni RoI considerata.

Il ToA è risultato il discriminante peggiore per individuare sezioni danneggiate, dimostrando come le dimensioni delle difettosità non incidano molto nel tempo di trasmissione, in quanto trascurabili rispetto alle distanze percorse nel mezzo.

A parità di posizione della sonda, sull'asse del tempo l'intervallo preferenziale per individuare le difettosità attraverso RMS² è stato intorno ai 70 μs – 80 μs , che corrisponde alla completa propagazione delle onde dirette fino ai punti di acquisizione più lontani per il campione in prova, e quindi adatto a valutare tutte le disomogeneità nel materiale sopra la linea laser. I valori ottenuti del RMS²c con un $\overline{\text{SNRc}} \approx 2$ dB danno margine per diminuire la potenza del laser, ripristinando la condizione di controllo non distruttivo. Questo sistema laser-ultrasonics rappresenta quindi una soluzione alternativa a setup sperimentali che utilizzano sonde a ultrasuoni in configurazione di trasmissione, che hanno il limite di non poter ispezionare sezioni complesse data la direttività del fascio introdotto nel campione, oltre al vincolo di accoppiamento acustico della sorgente.

Futuri sviluppi nella sperimentazione di questo setup per il controllo qualità risiedono lato hardware, nell'utilizzo di sonde in ricezione con una banda a frequenze maggiori. Ciò consentirebbe di avere una migliore risoluzione del difetto con la possibilità di

5. Conclusioni e sviluppi futuri

discernere discontinuità adiacenti (caso L605 difetto gambo e foto) data la minore lunghezza d'onda considerata. Ciò comporta però anche un minor SNR per via della maggiore attenuazione che si riscontrerebbe, ma stabilire l'effetto risultante sul contrasto delle immagini C-scan non è semplice senza una prova sperimentale.

Lato software invece può essere utile applicare dei filtri adattati ^[18] in cascata al filtro Butterworth per aumentare le differenze tra waveform relativi a sezioni integre e difettate.

Bibliografia

- [1] Associazione Italiana di Metallurgia, *Le Prove non Distruttive*, vol. I, 2000.
- [2] «Texas non destructive testing academy & level III services», [Online]. Available: <https://www.txndt.com/blog/non-destructive-testing-when-is-liquid-penetrant-testing-the-best-method>.
- [3] R.U.M.I.L - controlli non distruttivi, ispezioni e collaudi, [Online]. Available: <https://www.rumilcnd.it/prove-non-distruttive/>.
- [4] ISPECO - Ispezioni e controlli, [Online]. Available: https://www.ispeco.it/it/servizi/controlli-non-distruttivi-avanzati_105/controllo-magnetoinduttivo-funi-metalliche-seggiovie-funivie-ski-lifts_134
- [5] C. Baishya, B. K. Saxena, V. Bhattacharya e R. K. Vijay, *Ultrasonics in railways*, Indian Railways, 2008.
- [6] Intertek, «www.intertek.com», [Online]. Available: <https://www.intertek.com/non-destructive-testing/ndt-specialist/eddy-current-tubes/>
- [7] M. Riyaz, M. Anwar, . M. Y. Ahmed, . S. Siddiqui e . S. Abubaker Pasha, «Testing by Radiography on Welded Mild Steel (NDT Method)», *International Journal For Science Technology And Engineering*, 2017.
- [8] The Ultran Group, «www.ultrangroup.com» [Online]. Available: <https://ultrangroup.com/applications/>
- [9] E. Arif S., Y. Goksen G. e K.-Y. Butrus T., «Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Theory and Technology», *Journal of Aerospace Engineering*, 2003.
- [10] Xarion, «www.ndt.net» [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/aero2020/papers/B20057.pdf>
- [11] C. B. Scruby e L. E. Drain, «*Laser Ultrasonics Techniques and Applications*», Taylor & Francis Group, 1990.

Bibliografia

- [12] A. Cavuto, M. Martarelli, G. Pandarese, E. P. Tomasini e G. M. Revel, «Experimental investigation by laser ultrasonics for high speed train axle diagnostics» *Ultrasonics*, 2014.
- [13] G. Pandarese, M. Martarelli, A. Cavuto e G. M. Revel, «Train wheel diagnostics by laser ultrasonics», *Measurement*, 2015.
- [14] P. Castellini, G. M. Revel, L. Scalise e R. M. De Andrade, «Experimental and numerical investigation on structural effects of laser pulse for modal parameter» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 32, pp. 565-581, 2000.
- [15] J. P. Monchalin, «Non contact generation and detection of ultrasound with lasers» [Online]. Available: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/non-contact_ultrasonics/722_monchalin.pdf
- [16] A. Cavuto, G. Pandarese, M. Martarelli, G. M. Revel e E. P. Tomasini, «FEM based design of experiment for train wheelset diagnostics by laser ultrasonics» *Ultrasonics*, vol. 113, 2021.
- [17] E. Guillorit e H. Tretout, «www.ndt.net» [Online]. Available: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/laser_ultrasonics/276_guillorit.pdf
- [18] S. Mariani, T. Nguyen, R. R. Phillips, P. Kijanka, F. Lanza di Scalea, W. Staszewski, M. Fateh e G. Carr, «Noncontact ultrasonic guided wave inspection of rails» *Structural Health Monitoring*, n. 12(5-6), pp. 539-548, 2013.
- [19] Ju Feng Special Steel Co., Ltd., «Servizio di lavorazione di acciai e acciai ad alto tenore di carbonio» [Online]. Available: <https://www.jfs-steel.com/it/category/Acciaio-al-carbonio/7.html#:~:text=Acciaio%20al%20carbonio-,L'acciaio%20ad%20alto%20tenore%20di%20carbonio%20%C3%A8%20un%20tipo,le%20esigenze%20immediate%20dei%20clienti..>
- [20] S. K. Sarna, «High Strength Carbon and Low Alloy Steels» [Online]. Available: <https://www.ispatguru.com/high-strength-carbon-and-low-alloy-steels/>
- [21] J. M. Buckley. [Online]. Available: <https://ndtinspect.com/an-introduction-to-eddy-current-testing-theory-and-technology/>

Bibliografia

- [22] Guanyu Steel Tube Co., «Ultrasonic Velocity Acoustical Properties Of Various Materials» [Online]. Available: <https://tubingchina.com/Ultrasonic-Velocity-Acoustical-Properties-Of-Common-Materials.htm>
- [23] M. Bracale. [Online]. Available: http://www.ingbiomedica.unina.it/studenti/ing_bio/mat_did/PB_SB/Gli%20Ultrasoni.pdf
- [24] K. Ono, «A Comprehensive Report on Ultrasonic Attenuation of Engineering Materials, Including Metals, Ceramics, Polymers, Fiber-Reinforced Composites, Wood, and Rocks», 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2230/htm>
- [25] A. Perna, «Applicazione della tecnica laser-ultrasonics per ispezione di difetti interni nei materiali», 2021, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12075/8163>
- [26] W. Nowacki, Thermoelasticity, Pergamon Press, 1962.
- [27] Continuum, Operation and Maintenance Manual NY60 & 61 Lasers.
- [28] Imaginant, «DPR300 Ultrasonic Pulser/Receiver», 2022. [Online]. Available: <https://www.imaginant.com/ContentPages/Documents/DPR300-Data-Sheet.pdf>
- [29] National Instruments, «Dispositivo oscilloscopio», 2022. [Online]. Available: <https://www.ni.com/it-it/shop/hardware/products/oscilloscope-device.html?modelId=122520>
- [30] Physik Institute Universität Zürich, «Choosing the Correct Smoothing Window» [Online]. Available: https://www.physik.uzh.ch/local/teaching/SPI301/LV-2015-Help/lvanlsconcepts.chm/Choosing_Smoothing_Window.html
- [31] «Fase lineare» [Online]. Available: https://hmn.wiki/it/Linear_phase
- [32] M. E., «Basic principles of thermal wave physics and related techniques» 2013. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Basic-principles-of-thermal-wave-physics-and-Mar%C3%ADn/97b205759380a0fc9aa2124624b212b397e9553f>
- [33] K. Nakamura, Ultrasonic Transducers, Woodhead Publishing, 2012.

Bibliografia

- [34] R. Nordmann e H. Birkhofer, Elementi di macchine e mecatronica. Progettazione dei sistemi tecnici, E. Manfredi, McGraw-Hill, 2006.
- [35] W. Shaowen, C. Sullivan e M. H. Jeong, «Analysis of dynamic radiation level changes using surface networks», 2016.