

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Spaziale



**Ottimizzazione della tecnica sperimentale “Pulse Phase
Thermography” per il controllo non distruttivo di
provini sottili**

Relatore:

Prof. Ing. Alfonso NIRO

Tesi di laurea di:

Luigi VITALI

Matr. 707063

Anno Accademico 2011 - 2012

Indice

Sommario	9
Abstract	11
Introduzione	13
1 Introduzione ai controlli non distruttivi	15
1.1 NDT attivi basati su termografie	18
1.2 Pulsed Thermography - PT	19
1.3 Stepped Heating - SH	20
1.4 Lock-in Thermography - LT	21
1.5 Pulsed Phase Thermography - PPT	21
1.6 Altri metodi	22
1.6.1 PT, altre trasformazioni	22
1.6.2 LT, Contrasto relativo di fase	23
1.6.3 Frequency Modulated Thermal Wave Imaging	24
2 Stato dell'arte	25
2.1 Modelli teorici ed analitici	25
2.2 Modelli numerici	26
2.3 Applicazioni sperimentali	26
2.3.1 Principali gruppi di studio	26
2.3.2 Risultati, Plexiglas®	27
2.3.3 Calcolo del diametro	28
2.3.4 Applicazioni spaziali	28
2.4 Domande aperte	29
2.5 Stato dell'arte ThermALab	29
2.6 Obiettivi del presente lavoro	30
3 Basi teoriche	31
3.1 Onde termiche	32
3.1.1 Soluzione 1D	32

3.1.2	Riflessione e trasmissione	33
3.1.3	Riflessione dell'onda 1D	35
3.2	Risposta all'impulso	36
3.2.1	Riflessioni multiple, modello difetto 1D	36
3.2.2	Modello assialsimmetrico	37
3.3	Trasformata di Fourier	39
3.4	Riscaldamento impulsivo, trasformata	40
4	Apparato e procedure sperimentali	43
4.1	Eccitazione	43
4.2	Termocamera	44
4.3	Acquisizione	45
4.3.1	Frequenza di campionamento	45
4.3.2	Tempo di osservazione	46
4.3.3	Taratura e calibrazione	47
4.4	Fast Fourier Transform (FFT)	47
4.5	Trattamento delle immagini	48
4.5.1	Crazy pixel, filtro mediano	48
4.5.2	Rumore ad alta frequenza, filtro gaussiano	49
4.6	Ricostruzione morfologica	50
4.7	Stima della profondità, correlazione	50
4.8	Calcolo del coefficiente C1	51
5	Analisi numerica	53
5.1	Lastra plexiglas 2 cm	54
5.1.1	Validazione	55
5.2	Lastra plexiglas 4 mm	56
5.2.1	Validazione	56
5.3	Regressione automatica dei fori	58
6	Risultati	61
6.1	Analisi sperimentali	61
6.1.1	Procedura	61
6.1.2	Lastra plexiglas 2 cm	64
6.1.3	Lastra plexiglas 4 mm	65
6.1.4	Misure convenzionali con termocoppie	65
6.2	Analisi numeriche	68
6.2.1	Lastra plexiglas 2 cm	68
6.2.2	Lastra plexiglas 4 mm	71
6.2.3	Variazione di materiale del foro	75

7	Definizione dei parametri ottimali	77
7.1	Impulso	77
7.1.1	Durata	77
7.1.2	Potenza	78
7.2	Acquisizione	79
7.2.1	Frequenza di campionamento	79
7.2.2	Tempo di osservazione	79
8	Conclusioni e sviluppi futuri	81
A	Trasformata del rettangolo, dimostrazione	83
B	Procedura di analisi delle termografie	85
C	Provini in plexiglas	87
D	Modifiche dell'apparato sperimentale	91
	Bibliografia	96

Elenco delle figure

1.1	Acoustic emission Testing	16
1.2	Magnetic Testing	17
1.3	Schema generale delle IRNDT	18
1.4	Apparato sperimentale, brevetto 0-089-760-A2 1983, [76]	19
2.1	Apparato per termografie dell'Université Laval	27
2.2	Apparato per termografie sulle ali dello Space Shuttle, [20]	28
3.1	Lunghezza termica di diffusione	33
3.2	Legge di Snell	34
3.3	Attenuazione dell'onda riflessa 1D, varie profondità	36
3.4	Transitorio di raffreddamento, misurato (lastra 2cm, impulso 20s) e teorico	37
3.5	Spettro di ampiezza normalizzato per vari impulsi	40
4.1	Schema concettuale della PPT	43
4.2	lampada alogena e otturatore	44
4.3	Termocamera Raytheon Radianc HS	45
4.4	valori di μ , plexiglas®, t_{oss} 20 minuti	46
4.5	Curva di taratura della termocamera	47
4.6	Rumore a temperatura costante, diversi tempi di integrazione	48
4.7	Termografia, visualizzazione 3D	49
4.8	Un crazy pixel si staglia sullo sfondo	50
4.9	Regressione per il calcolo di C1	52
5.1	Mesh del modello plexi2cm con foro z6D10	54
5.2	Transitorio di raffreddamento, numerico e sperimentale, impulso 20s	55
5.3	Transitorio di raffreddamento, confronto modelli numerici	55
5.4	Mesh del modello plexi4mm con foro z2D8	56
5.5	Spettro di ampiezza di diversi impulsi	56
5.6	Transitorio di raffreddamento, confronto modelli numerici	57
5.7	Transitorio di raffreddamento, numerico e sperimentale	57

6.1	Termografia del foro D4z4, $t = 28s$	62
6.2	D4z4, Analisi di fase, $f = 1.667 \cdot 10^{-3}$ Hz	62
6.3	D4z4, filtrato, $f = 1.667 \cdot 10^{-3}$ Hz	63
6.4	D4z4, correlazione	63
6.5	Plexi 2 cm, termocoppie fronte e retro	66
6.6	Plexi 4 mm, termocoppie fronte e retro, I 20	67
6.7	Plexi 4 mm, termocoppie fronte e retro, I 5	67
6.8	Differenza di fase, diametro costante, profondità variabile . . .	69
6.9	Differenza di fase, diametro variabile, profondità costante . . .	69
6.10	Lunghezza termica di diffusione μ a basse frequenze, plexiglas®	70
6.11	Regressione lineare, legame $z-\mu$	70
6.12	Differenza di fase, sperimentale e numerico	71
6.13	Differenza di fase, impulso variabile	72
6.14	Differenza di fase, numerico - sperimentale	72
6.15	Differenza di fase, numerico - sperimentale	73
6.16	Differenza di temperatura, numerico - sperimentale	73
6.17	diagramma di fase, frequenza 3	74
6.18	diagramma di fase, due potenze	74
6.19	Variazione di \hat{r} plexiglas - materiale 2	75
6.20	ΔT su plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}	75
6.21	ΔT su plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}	76
6.22	ΔT massimo, plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}	76
C.1	Provino plexiglas 2 cm, fronte	87
C.2	Provino plexiglas 2 cm, retro	88
C.3	Provino plexiglas 4 mm, fronte	88
C.4	Provino plexiglas 4 mm, retro	89
D.1	Lampade per apparato sperimentale	91
D.2	Lampade montate	92
D.3	Box prova, disegno	92
D.4	Box prova costruito	93

Elenco delle tabelle

3.1	Coefficienti di riflessione e trasmissione	35
4.1	salto iniziale di temperatura superficiale, lastra plexi 2 cm	44
5.1	Condizioni a contorno	54
5.2	Parametri PPT, definibili dall'utente	58
5.3	Parametri PPT, provino	58
5.4	Output regressione automatica, plexi 2cm	59
5.5	Output regressione automatica, plexi 4mm	59
6.1	Parametri della prova, plexi 2 cm	61
6.2	Fori 2cm, I20s, t_{obs} 1200s, $C1 = 1.48$	64
6.3	Parametri della prova, plexi 4 mm	65
6.4	Fori, I 20s, t_{obs} 1200s	65
6.5	Parametri di prova, plexi 2cm	68
6.6	Profondità vere e calcolate	71
7.1	Durata impulso, esempio	78
7.2	Analisi impulso per plexi4mm	78
C.1	Proprietà Plexiglas	87

Sommario

L'obiettivo del presente lavoro è il miglioramento della tecnica sperimentale basata su termografie all'infrarosso "Pulse Phase Thermography" (PPT) per l'individuazione di difetti all'interno di materiali non metallici e la loro caratterizzazione in termini di estensione e profondità. In particolare, l'attenzione è stata rivolta alla definizione dei parametri ottimali per l'analisi su provini in plexiglas il cui spessore è nell'ordine dei millimetri, che si differenziano da quelli spessi due centimetri studiati in precedenza per il contributo non trascurabile dell'onda termica riflessa dal fondo sulla temperatura superficiale. Dopo un'introduzione sulle tecniche termografiche per controlli non distruttivi e sugli aspetti teorici del problema, viene illustrato l'apparato sperimentale e descritta in dettaglio la procedura PPT utilizzata. È quindi introdotto e validato il modello ad elementi finiti rappresentativo del fenomeno. Sono poi presentati i risultati di campagne sperimentali su lastre in plexiglas di 2 cm e 4 mm di spessore con analisi dell'errore sul calcolo della profondità, quindi i risultati numerici, che mostrano il comportamento dei provini difettati al variare dei parametri di prova e sono propedeutici agli elementi innovativi del lavoro, cioè la definizione dei parametri ottimali ed il calcolo dei requisiti per l'individuazione dei fori in vari materiali. Tale calcolo è basato in parte su considerazioni teoriche ed in parte sull'utilizzo di un programma di regressione su vari fori appositamente realizzato. Infine secondo le specifiche risultanti è stato modificato l'apparato sperimentale aumentando la potenza degli elementi riscaldanti di circa tre volte.

Parole chiave: Controlli Non Distruttivi; Termografia IR; Analisi di Fase; Pulse Phase Thermography; PPT.

Abstract

The purpose of the present work is the improvement of the experimental technique “Pulse Phase Thermography” (PPT) for the identification and characterization of size and depth of defects within non-metallic materials. In particular, attention has been given to the definition of the optimal parameters for the analysis of Plexiglas specimens whose thickness is a few millimeters, which differ from those two centimeters thick previously studied for the non-negligible contribution of the thermal wave reflected by the back surface on the surface temperature. After an introduction on the thermographic techniques for non destructive testing (NDT) and their theoretical aspects, the experimental apparatus and the used PPT procedure are described in detail. Then the finite element model representative of the phenomenon it’s introduced and validated. The results of experimental campaigns on Plexiglas plates 2 cm and 4 mm thick and the numerical results are then expounded. The numerical model is used to show the behavior of the defective test specimens while varying the parameters of the test: this analysis leads to the innovative element of the work, that is the definition of the optimal parameters and the calculation of the requirements for the detection of defects in various materials. Their estimate is based partly on theoretic considerations and partly on a software that analyzes multiple defects given the parameters of the trial, developed during this work. To conclude, according to the results, the experimental apparatus has been modified by increasing the power of the heating elements by approximately three times, extending the range of the detectable defects.

Keywords: Non Destructive Testing; IR thermography; Phase Analysis; Pulse Phase Thermography; PPT.

Introduzione

Il presente lavoro di tesi verte sullo studio della termografia pulsata con analisi di fase (*Pulse Phase Thermography*, PPT), tecnica di controllo non distruttivo introdotta nel 1996 da Maldague e Marinetti ([35]) ed in continua evoluzione, grazie alla possibilità di analizzare una grande varietà di materiali con un equipaggiamento relativamente semplice ed in totale sicurezza per l'operatore tipica dei controlli termografici, con il vantaggio di una scarsa sensibilità alle variazioni locali di emissività ed al riscaldamento non omogeneo delle superfici. L'obiettivo di questo lavoro è definire i parametri del metodo per l'analisi sperimentale, in particolare di provini sottili, aventi spessore nell'ordine dei millimetri. A tal fine, dopo uno studio teorico del problema e l'analisi dello stato dell'arte, si è proceduto a campagne sperimentali, in primo luogo per acquisire il metodo e confermare i lavori precedenti su provini spessi (2 cm) e successivamente su nuovi provini con variazione dei parametri di eccitazione. Parallelamente, è stato sviluppato un modello ad elementi finiti per la comprensione e la previsione della risposta termica che, una volta validato confrontandolo con i dati sperimentali, è stato utilizzato per lo studio dei parametri che influenzano la prova e come strumento per la loro definizione.

In particolare, dopo un'introduzione sulle tecniche di controllo non distruttivo ed un approfondimento sulle tecniche basate sulla termografia ad infrarossi di uso corrente (Capitolo 1), viene fatta un'analisi dello stato dell'arte finalizzata alla comprensione dei limiti attuali della tecnica e delle possibilità di sviluppo all'interno del ThermALab (Capitolo 2). Nel Capitolo 3 vengono presentati i principali concetti teorici su cui è fondata la PPT, in particolare la teoria delle onde termiche. Nel Capitolo 4 sono descritti la tecnica di analisi, sottolineandone i vari elementi e le problematiche loro connesse, e l'apparato sperimentale. Il Capitolo 5 contiene la descrizione dei modelli numerici. Inizialmente sono presentati i modelli dei provini disponibili per l'analisi sperimentale, aventi spessore 2 cm e 4 mm, e viene validato il codice confrontandone i risultati con l'andamento delle termografie, scoprendo come per provini sottili, contrariamente a quelli spessi, sia necessario inserire condizioni a contorno di tipo convettivo per simulare il raffreddamento. Infine viene spiegato come il codice venga utilizzato per l'analisi parametrica su

un'insieme di fori. Nel Capitolo 6 vengono infine presentati i risultati sperimentali e numerici. I risultati sperimentali vengono introdotti illustrando nel dettaglio la procedura per il singolo foro e seguiti da un'analisi critica. I risultati numerici sono finalizzati a dimostrare la correttezza del modello sviluppato e ad evidenziare, attraverso l'analisi di singoli fori, i comportamenti della differenza di fase tra difetto e zona intonsa al variare dei parametri di eccitazione termica ed acquisizione delle termografie. Infine, è riportato e presentato l'output del programma di regressione automatica, che introduce il capitolo successivo. Nel Capitolo 7 viene descritta la procedura per la determinazione dei parametri dell'analisi in funzione del materiale e dello spessore, basata in parte sull'analisi teorica e in parte sui dati ricavati dal programma di regressione automatica, procedura che costituisce la sintesi del lavoro numerico-sperimentale. Il Capitolo 8 riporta le conclusioni del lavoro e le indicazioni per gli sviluppi futuri.

In appendice vengono riportate la trasformata di Fourier dell'impulso termico (appendice A), la procedura Matlab® utilizzata per l'analisi dei dati sperimentali (appendice B), le immagini e le caratteristiche dei provini utilizzati (appendice C) ed il progetto di alcune componenti realizzate per il miglioramento dell'apparato sperimentale (appendice D).

Capitolo 1

Introduzione ai controlli non distruttivi

I metodi di controllo non distruttivo (Non Destructive Testing, NDT) sono “metodi, test, procedure eseguiti su un qualunque oggetto da esaminare senza alterarlo in alcun modo, finalizzati a determinare la presenza di difetti che possano causare problemi nella vita operativa dell’oggetto stesso” ([6]). I metodi NDT vengono adottati, secondo la definizione, per determinare la presenza di diversi tipi di anomalie come difetti, discontinuità, perdite, imperfezioni nei materiali, componenti o assemblati senza condizionarne la funzionalità e l’integrità.

I test distruttivi, invece, sono definiti come “test di materiali o oggetti, distruttivi o irreversibili, da cui si ricava una valutazione quantitativa delle loro caratteristiche” ([6]), come il modulo di elasticità, la duttilità, la resistenza alla corrosione o agli impatti. Questi test forniscono importanti indicazioni per il progetto dei componenti e la previsione del loro comportamento in servizio, visto che spesso vengono riprodotte le stesse sollecitazioni attese durante la vita operativa. Il provino durante il test viene distrutto o la sua funzionalità viene compromessa, pertanto non può essere usato per nessun altro scopo oltre il test. Se ne ricavano soprattutto informazioni quantitative che non richiedono interpretazioni e stabiliscono standard e specifiche.

I metodi NDT svolgono una funzione complementare. Forniscono meno informazioni quantitative ed i loro risultati vanno spesso interpretati, ma l’oggetto di prova può essere riutilizzato dopo il test oppure può essere testato direttamente durante il suo funzionamento. Infatti, i metodi NDT possono essere utilizzati in previsione della manutenzione o come sistemi di sicurezza. Inoltre, vengono impiegati in maniera sempre crescente in fase di produzione, come controllo del processo manifatturiero sia dei singoli pezzi, verificandone l’integrità o le proprietà fisiche, che degli assemblati: in questo modo

è possibile prevenire costose riparazioni o, in riferimento al campo spaziale, danneggiamenti che possono mettere a rischio missioni dal costo elevato o la sicurezza di un equipaggio.

La norma UNI-EN ISO 9712:2012 [10] stabilisce i principi per la qualificazione e la certificazione del personale incaricato di effettuare prove non distruttive in campo industriale, offrendo una classificazione delle principali tecniche:

- **VT** - *Visual Testing*: Sistema di controllo visivo, utile a localizzare cricche superficiali o imperfezioni nelle saldature.
- **AT** - *Acoustic emission Testing*: Sistema che si basa sull'acquisizione di segnali sonori emessi dalle zone difettate di un corpo sotto sforzo. Il sensore è tipicamente di tipo piezoelettrico.

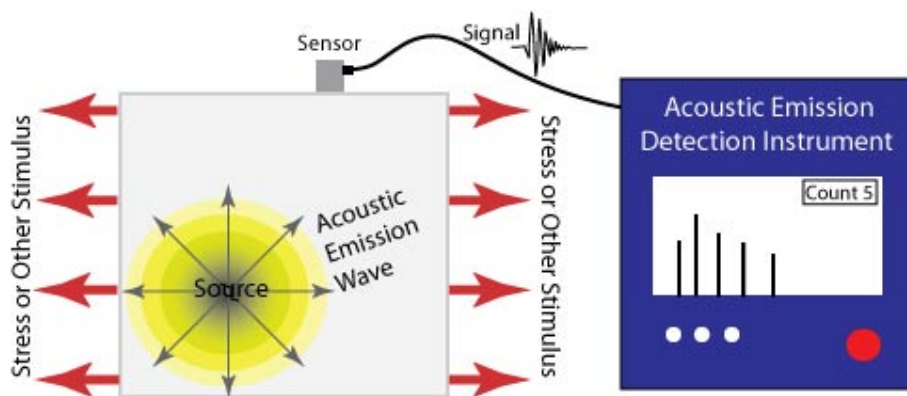


Figura 1.1: Acoustic emission Testing

- **RT** - *Radiographic Testing*: Vengono eseguite radiografie sul materiale. Sistema molto usato ma che impone particolari misure per la sicurezza dell'operatore.
- **UT** - *Ultrasonic Testing*: Tecnica che fa impiego di onde acustiche ad alta frequenza per la localizzazione di difetti in profondità, che si rilevano misurando il tempo di riflessione dell'onda.
- **ET** - *Eddy Current Testing*: Test che si basa sull'esame delle correnti parassite indotte mediante un campo magnetico alternato. Il difetto viene individuato nel momento in cui altera il campo magnetico indotto. Il materiale da esaminare deve essere conduttivo e l'analisi è limitata a basse profondità.

- **MT** - *Magnetic Testing*: Si verificano le alterazioni di flusso del campo magnetico imposto al materiale dovute a difetti mediante polveri ferromagnetiche disposte sulla sua superficie.

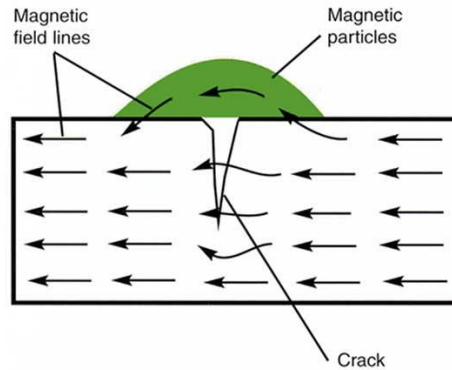


Figura 1.2: Magnetic Testing

- **ST** - *Strain gauge Testing*: I sensori di deformazione permettono un controllo costante sullo stato delle strutture durante la loro vita operativa. Non consentono tuttavia una valutazione precisa dei difetti, ma solo dei loro effetti sulla struttura.
- **PT** - *Penetrant Testing*: Introdotto come controllo per le leghe leggere non ferromagnetiche, consiste nell'esaltazione della visibilità di difetti superficiali mediante contrasto cromatico tra una sostanza liquida che penetra per capillarità nei difetti (penetrante) ed uno sfondo di contrasto (rilevatore).
- **TT** - *Thermographic Testing*: Si analizza la risposta termica di un materiale, rilevando difetti che presentano discontinuità delle proprietà termiche. Può operare a profondità maggiori della maggior parte delle tecniche elencate e non è limitata dalla tipologia del materiale.

Altra tecnica rilevante è la *shearografia*, che consiste nella ripresa con telecamere con particolari accorgimenti ottici di una superficie eccitata in vari modi, meccanicamente o termicamente, ed illuminata con un laser, secondo la tecnica dell'interferometria olografica. È possibile individuare i difetti rilevando il diverso comportamento elastico della superficie dei provini in corrispondenza dei difetti.

Si può notare che la maggior parte di queste tecniche sono impiegabili solo per analisi superficiali o quasi superficiali di materiali metallici. Nel

campo dei materiali tipicamente impiegati nel settore aerospaziale, leghe leggere o compositi, e volendo identificare difetti profondi, lo spettro di tecniche impiegabili si restringe al controllo ultrasonico, termografico, radiografico e shearografico.

1.1 NDT attivi basati su termografie

I metodi di controllo non distruttivo (NDT) basati su termografie (IRNDT) e riscaldamento esterno, da cui il termine *attivo*, si stanno affermando negli ultimi anni principalmente grazie alla loro larga banda di applicazioni, alla relativa semplicità dell'equipaggiamento loro necessario, alla rapidità con cui si possono ispezionare superfici dell'ordine del metro quadrato senza contatto e avendo accesso a solo una faccia del materiale, ed alla possibilità di identificare profondità e dimensioni del difetto.

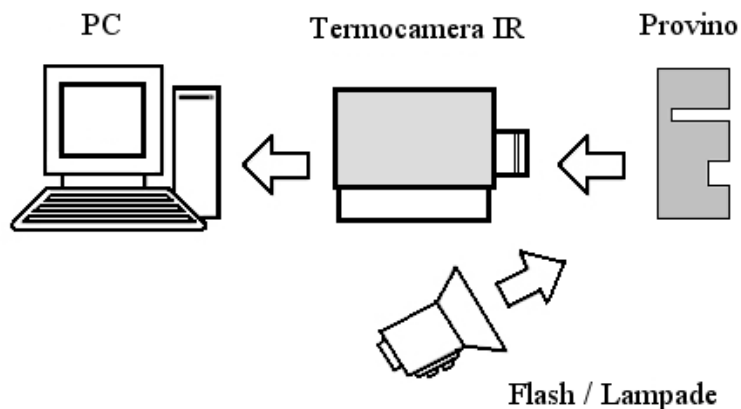


Figura 1.3: Schema generale delle IRNDT

Per contro, questi metodi presentano numerose problematiche inerenti sia alla tecnica della prova, a partire dalla gestione dello stimolo termico per continuare con le difficoltà legate ad effetti spuri come riflessioni o variazioni di emissività del materiale, sia ai difetti in esame, sono rilevabili solo quelli che comportano una discontinuità delle proprietà termiche del materiale, ed infine quelle relative all'interpretazione dei risultati, campo nel quale sono state sviluppate e continuano ad esserlo metodologie che combinano più tecniche, dal trattamento dell'immagine alle analisi in frequenza o alla correlazione statistica. I metodi si differenziano per tipo di eccitazione termica, modalità di osservazione e trattamento dei dati: vengono qui presentati i principali.

1.2 Pulsed Thermography - PT

Metodo termografico più semplice e primo in ordine cronologico, divulgato da articoli risalenti al 1987 ma con primi brevetti relativi risalenti al 1983 ([76]), ben prima dell'avvento dell'era dell'immagine digitale (figura 1.4). Il provino è scaldato con un breve impulso termico, da qualche millisecondo per materiali altamente conduttivi a qualche secondo per quelli a minore conduttività, si registra quindi il raffreddamento: se sulla faccia soggetta a riscaldamento si parla di metodo in *riflessione*, se sulla faccia opposta di metodo in *trasmissione*. In quest'ultimo caso non è possibile quantificare la profondità del difetto, in quanto le onde termiche percorrono tutte la medesima distanza e non presentano sfasamenti, anche se in un largo numero di applicazioni è sufficiente assicurarsi dell'assenza di difetti.

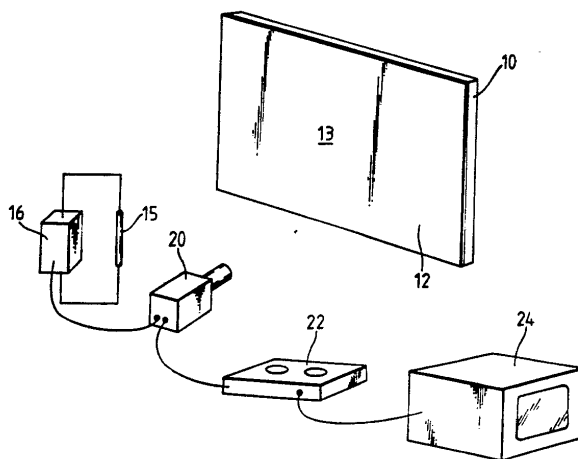


Figura 1.4: Apparato sperimentale, brevetto 0-089-760-A2 1983, [76]

L'analisi si basa sul calcolo del contrasto di temperatura tra la zona *sound*, integra, e la zona difettata:

$$C(t) = T_{def}(t) - T_{sound}(t) \quad (1.1)$$

In letteratura [5] sono presenti ulteriori definizioni del contrasto. Una regola empirica dice che *il raggio del più piccolo difetto riscontrabile deve essere da una a due volte la sua profondità*. Questa regola vale come linea guida per tutte le tecniche NDT con termografie, anche se recentemente è stata messa in discussione da un'analisi analitica del problema [30].

Pro:

- Semplicità e velocità di applicazione (molto usata per analisi in situ);
- Tecnica valida per difetti prossimi alla superficie o lastre sottili;
- Impulso termico applicabile con diverse metodologie.

Contro:

- Inadeguata per difetti più profondi: la perdita di contrasto è proporzionale a z^3 ;
- Difficile caratterizzazione precisa del difetto;
- Basso contrasto delle immagini;
- Necessità di un riscaldamento uniforme.

1.3 Stepped Heating - SH

Si esegue la termografia sul provino mentre questo viene scaldato sulla stessa faccia a bassa potenza mediante un laser ad argon o microonde. La misura principale riguarda il tempo t_T (*transit time*) in cui l'andamento della temperatura superficiale si discosta da quello ottenibile in un provino senza difetti. t_T è legato alla profondità L del difetto dalla relazione

$$t_T \sim \frac{0.36L^2}{\alpha} \quad (1.2)$$

Pro:

- Non è necessario confrontare la misurazione su una zona senza difetti, noto il comportamento della zona *sound*;
- Non necessita di un forte impulso termico che può danneggiare la superficie del provino;
- Offre buoni risultati per provini spessi;
- Possibilità di misurare la profondità del provino.

Contro:

- Maggiore complessità della strumentazione, tipicamente del laser per scaldare, anche se è documentato il riscaldamento con lampade;
- Non adatta per fenomeni con costanti di tempo veloci, come analisi superficiali su materiali altamente conduttivi.

1.4 Lock-in Thermography - LT

In analogia con quanto accade con un circuito elettrico lineare a regime, ad un ingresso termico sinusoidale caratterizzato da ampiezza e frequenza $[I, \omega]$ corrisponde una risposta avente la stessa frequenza ma ampiezza e fase differente $[A, \phi, \omega]$: le immagini termografiche vengono acquisite durante l'eccitazione per la durata di alcuni periodi (vedi [11]). Il punto di forza di questa tecnica è l'immagine di fase calcolata per ogni pixel della termografia, poco sensibile a disomogeneità di riscaldamento o a variazioni dell'emissività della superficie.

Pro:

- L'immagine di fase permette di scandagliare il materiale più in profondità: dal 40% al 70% in più rispetto alle immagini in ampiezza;
- Output semplice: un'immagine di ampiezza, generalmente scartata, ed una di fase;
- Le immagini di fase hanno un buon contrasto e sono maggiormente identificabili con procedure automatiche;
- Tutta la potenza fornita eccita la frequenza analizzata.

Contro:

- Necessità di prove a diversa frequenza per caratterizzare difetti a profondità differenti, con conseguente maggior durata della prova.
- Riflessione delle lampade sul provino, data la simultaneità tra eccitazione ed acquisizione.

1.5 Pulsed Phase Thermography - PPT

La PPT combina le tecniche PT e LT: viene analizzato nel dominio delle frequenze il transitorio di raffreddamento del provino sottoposto ad un impulso termico, che può variare a seconda della strumentazione utilizzata da qualche millisecondo a qualche secondo (vedi paragrafo 3.4). Si esegue quindi la trasformata di Fourier in forma discreta (DFT) della sequenza di immagini, ottenendo da N termografie $N/2 + 1$ diagrammi di fase utili, associati alle frequenze che vanno da zero fino a $N/2 \cdot \Delta f$, con $\Delta f = 1/t_{oss}$. I parametri di eccitazione ed acquisizione vanno accuratamente calibrati in funzione del materiale (i.e. della sua diffusività termica), del suo spessore e del range di profondità dei difetti.

Particolare attenzione è rivolta verso le tecniche di trattamento dell'immagine ed inversione dei dati, cioè a come ricavare caratteristiche del difetto in base ai dati misurati. Gli approcci documentati sono numerosi, sia per il calcolo della profondità che per l'estensione.

Pro:

- Funziona come filtro passa-banda: le frequenze molto basse e molto alte, inutili ai fini dell'analisi, sono tagliate per la natura stessa del metodo;
- Unisce i vantaggi di LT e PT, cioè immagini con buon contrasto (immagini di fase), semplicità dell'applicazione ed insensibilità al variare delle condizioni di illuminazione e di emissività superficiale;
- Buon metodo per un ampio spettro di applicazioni, mentre gli altri sono più legati alla tipologia della prova.

Contro:

- Bassa risoluzione in frequenza per alte profondità del difetto, cioè difficoltà ad identificare con precisione la profondità di difetti più lontani dalla superficie;
- Per provini sottili o difetti superficiali, sono necessari impulsi brevi e forti per eccitare le alte frequenze interessate;
- In applicazioni specifiche può essere superato da altri metodi (vedi [37]).

1.6 Altri metodi

In questa sezione si citano alcuni dei principali metodi il cui sviluppo ed utilizzo è legato prevalentemente ad un solo gruppo di studio.

1.6.1 PT, altre trasformazioni

Sebbene quella di Fourier sia la trasformata più comunemente applicata ad una serie di termografie, ve ne sono altre sia assodate che in fase di studio, i cui principi sono descritti in [47] e, per applicazioni archeologiche ma di interesse metodologico, sono messe a confronto in [16].

Derivata seconda: Tecnica che consiste semplicemente nell'effettuare due derivate temporali per ogni pixel, mostrando la *velocità* di variazione di temperatura e la relativa *accelerazione*. Questa operazione presuppone

una tecnica di ricostruzione dei dati, ad esempio l'interpolazione polinomiale, per ovviare al problema del rumore ad alta frequenza tipico dei sensori utilizzati, che renderebbe impossibili le operazioni di derivazione.

Wavelets: Si esegue una trasformata concettualmente analoga alla DFT, utilizzando come base non sinusoidi ma *wavelets* (ondine), funzioni oscillatorie di durata limitata i cui parametri sono definiti dall'utente:

$$W_f(S, T) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h_{ST}^*(t)dt$$

Questa tecnica mira ad ottenere i vantaggi dell'analisi di fase mantenendo la coordinata temporale e favorire le valutazioni quantitative sulla profondità del difetto.

Trasformata di Hough: La trasformata Hough consiste in una trasformata da uno spazio cartesiano (x, y) ad uno spazio dei parametri (ρ, θ) , tale che

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$$

Nel campo delle termografie, viene usata per riconoscere il comportamento dei pixel in corrispondenza dei difetti, valutando quando il loro profilo di temperatura si differenzia rispetto a quello previsto analiticamente per la zona *sound*.

Principal Component Thermography (PCT): Tecnica che utilizza la *decomposizione ai valori singolari* (SVD), che consente di scrivere una matrice $\mathbf{A}_{M \times N}$ come

$$\mathbf{A}_{M \times N} = \mathbf{U}_{M \times N} \mathbf{S}_{N \times N} \mathbf{V}_{N \times N}^T$$

\mathbf{A} è la matrice dei valori delle termografie, riarrangiati in modo che ogni colonna contenga tutti i valori di una singola termografia ed il numero N delle colonne sia pari al numero delle termografie. Il risultato di questa analisi sono le *Empirical Orthogonal Functions* (EOF), cioè le colonne della matrice \mathbf{U} che, ridisposte come sequenza termografica, producono le immagini su cui valutare la presenza di difetti. Questa tecnica, finalizzata a produrre immagini con un miglior contrasto, è particolarmente onerosa in termini di tempi di calcolo.

1.6.2 LT, Contrasto relativo di fase

Tecnica spiegata in [57], per l'analisi su prove LT: si calcola il contrasto relativo di fase definito come

$$C_{rf}(f) = \frac{S_{def}(f) - S_{sound}(f)}{S_{sound}(f)}$$

Dove S_{def} e S_{sound} sono gli angoli di fase calcolati rispettivamente in una zona difettata ed una zona *sound*. Si determina la prima frequenza di visibilità del difetto (f_{tr}) imponendo un valore di soglia C_{tr} , stabilito in base alle deviazioni standard degli angoli di fase sulla zona *sound*. Dalla f_{tr} si stima la profondità del difetto con la nota

$$p = C_1 \mu = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_{tr}}}$$

con C_1 dipendente dal materiale.

1.6.3 Frequency Modulated Thermal Wave Imaging

Questa tecnica, inventata da Ghali e Mulavesaala [48] consiste in una combinazione fra le tecniche LT e PPT: l'acquisizione delle termografie è eseguita in riflessione durante l'eccitazione termica, che consiste non più in un'onda a data frequenza, ma in un segnale *chirp*, cioè con frequenza crescente linearmente con il tempo, in grado teoricamente di scandagliare tutta la profondità del provino.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Questo lavoro si pone nell'ambito delle NDT con termografie IR con impulso termico ed analisi di fase, ambito che, dalla comparsa del primo articolo relativo su riviste internazionali [35], ha suscitato l'interesse di un numero di gruppi di studio sempre crescente, grazie soprattutto alla grande varietà delle sue possibili applicazioni. Al contempo, le problematiche sia generali delle tecniche termografiche, sia relative alla singola applicazione, sono vaste ed hanno dato origine a diversi filoni di ricerca, il cui fine ultimo è sempre la precisa identificazione e caratterizzazione di difetti celati alla vista e, in subordine, l'automazione di tali procedure.

Gli studi pubblicati spaziano dall'analisi teorica, necessaria per stabilire le fondamenta del metodo, a quella numerica, avente come fine la validazione del modello teorico e la predizione del comportamento fisico, mentre negli ultimi anni questi filoni sono andati progressivamente esaurendosi, pur con qualche notevole eccezione, e la ricerca si è concentrata sui metodi di trattamento e trasformazione delle termografie e sull'ottimizzazione ed il confronto fra tecniche per specifiche applicazioni.

In questo lavoro l'attenzione è rivolta principalmente all'identificazione dei difetti in materiali non metallici in uso nell'industria aerospaziale ed al Polimetilmetacrilato (commercialmente Plexiglas®), che grazie alla sua conduttività ed alla sua isotropia è utilizzato come riferimento nella maggior parte degli studi.

2.1 Modelli teorici ed analitici

I primi studi approfonditi sulla PT sono antecedenti al 1990 ([25]), ma è con le pubblicazioni di Lau ed Almond ([26], [27]) che si è arrivati a definire il modello teorico di riferimento per il calcolo del transitorio di raffreddamento

di un provino difettato soggetto ad impulso termico, esposto anche nel presente lavoro (vedi 3.2.2). Solo recentemente lo studio analitico si è ampliato con un nuovo contributo di Almond [30] che propone due espressioni per il calcolo rispettivamente del contrasto di temperatura e del tempo al quale se ne manifesta il picco, anche per materiali la cui conduttività sul piano è diversa rispetto a quella sullo spessore, ponendo infine in discussione la regola empirica secondo la quale un difetto identificabile deve avere il rapporto fra diametro e profondità almeno unitario.

Fondamentale è infine lo studio della riflessione e rifrazione delle onde termiche [28], che prova sperimentalmente l'aderenza delle suddette alla legge di Snell (vedi 3.1.2), chiudendo i problemi sulla comprensione dei fenomeni alla base dei metodi IR.

2.2 Modelli numerici

I modelli numerici hanno quasi completamente sostituito le analisi teoriche come strumento di analisi preliminare e come primo confronto per i risultati sperimentali. Le sperimentazioni in questo campo riguardano soprattutto i modelli dei materiali compositi, analizzati nel dettaglio da Farooqi e Sheikh per valutarne le proprietà termiche [33], e modelli per lo studio dell'influenza di fattori contingenti, come il trattamento superficiale [53] o i diversi materiali che possono costituire il difetto [62]. Per quanto riguarda le analisi preliminari, è da segnalare il lavoro di Mulaveesala [24], dove l'indagine numerica è utilizzata per valutare le caratteristiche di nuove modalità di eccitazione termica: di particolare rilievo la modellazione del rumore per la simulazione del comportamento della termocamera.

2.3 Applicazioni sperimentali

2.3.1 Principali gruppi di studio

Le tecniche IRNDT in pochi anni sono passate da essere strumenti promettenti [18] ad essere una realtà consolidata dall'ampio spettro di applicazioni, non solo nel campo dell'ingegneria industriale ed aerospaziale in particolare, ma anche nell'ingegneria elettronica [64], in quella civile ([61], [63]) ed infine nell'ambito della salvaguardia del patrimonio artistico [16].

Il gruppo di studio più attivo a livello mondiale sull'argomento fa riferimento al prof. Maldague della Université Laval, Canada, autore con Sergio Marinetti del primo articolo dedicato alla PPT [35] e coautore di numerosi articoli sia propositivi di nuove modalità di trattamento dei dati ([39], [43],



Figura 2.1: Apparato per termografie dell'Université Laval

[46]) che di revisione e prova sperimentale delle tecniche allo stato dell'arte ([37], [52], [53]). Vavilov della Tomsk Polytechnic University è attivo nell'ambito delle NDT su compositi ([58], [22]). Mulaveesala dell'Indian Institute of Technology è attivo nello sviluppo della tecnica FMTWI, un'evoluzione della tecnica LT che prevede l'acquisizione simultanea ad un'eccitazione termica di frequenza crescente linearmente col tempo (*chirp*) [24]. Recentemente sono aumentate le pubblicazioni di gruppi di ricerca facenti riferimento ad università cinesi, come [69] e [64]. A livello italiano, oltre a Sergio Marinetti ed il gruppo del CNR di Padova, si occupano dell'argomento Carlomagno, Meola e Giorleo dell'Università Federico II di Napoli [44] e Montanini dell'Università di Messina, autore di uno studio comparativo tra tecnica LT e PPT su provini in Plexiglas® [57].

2.3.2 Risultati, Plexiglas®

Nel lavoro di Ibarra-Castanedo, González e Maldague [43] vengono analizzate lastre di 4 mm e 6.5 mm di spessore con difetti a profondità variabile, eccitate con flash da 6.4 kJ l'uno. Il riconoscimento dei fori è buono per difetti di diametro 10 mm, mentre quelli di diametro 5 mm, anche se individuati, consentono in soli tre casi su nove il calcolo della profondità con procedura automatica. Lo studio di Montanini [57] utilizza un provino di 8 mm di profondità con fori di diametro 10 mm a profondità variabile: l'identificazione della profondità è completa con tecnica LT, con un errore massimo del 9.7%, mentre il calcolo del diametro presenta un errore che aumenta all'aumentare della profondità, con un massimo del -27.5%, mentre la tecnica PPT non consente il rilevamento di difetti più profondi di 3 mm.

2.3.3 Calcolo del diametro

Il problema del calcolo dell'estensione del difetto è meno trattato in letteratura, in parte perché le tecniche per le quali è documentata l'identificazione del difetto con contorni nitidi ne consentono con qualche approssimazione il calcolo diretto. Tuttavia problemi legati al rumore ed al relativo filtraggio fanno sì che il bordo del difetto sia spesso sfumato e vi sia la necessità di sviluppare dei criteri per la stima precisa dell'estensione. Genest [72] propone una procedura automatica basata sul considerare difettato ogni pixel il cui valore di temperatura superi di 1σ la media della termografia, procedura che porta ad una sottostima compresa del 10 – 15%, mentre il gruppo di Maldague propone una tecnica di segmentazione [42] che prevede l'impostazione manuale del valore di soglia, tecnica poi ripresa nelle tesi di Gutiérrez Fajardo [13] e Casetta [15] con l'automazione della procedura.

2.3.4 Applicazioni spaziali

Per quanto riguarda l'ambito spaziale, la Avio S.p.A. ha provato ad affiancare la tecnica MT ai suoi consolidati test radiografici sugli involucri metallici e sul propellente solido di motori spaziali ([55]), ma anche a causa del sottodimensionamento dell'apparato utilizzato non è stata ritenuta una valida sostituzione delle metodologie consolidate, mentre la NASA applicava metodi PT con analisi PCA come prima analisi post rientro sul bordo di attacco delle ali ed il muso dello Space Shuttle [20], entrambi di fibra di carbonio rinforzata (C/C).

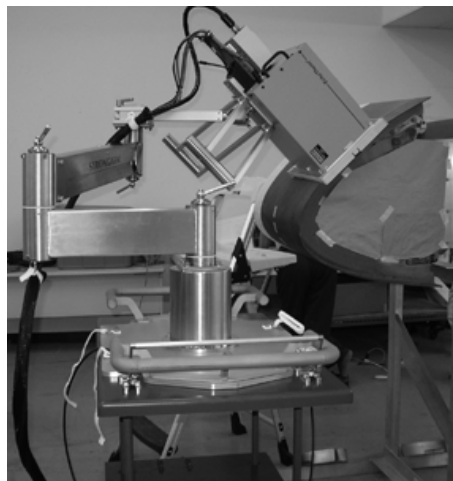


Figura 2.2: Apparato per termografie sulle ali dello Space Shuttle, [20]

2.4 Domande aperte

Allo stato attuale non sono ancora definiti con precisione i limiti della tecnica, stabiliti al momento da regole empiriche [22] o da studi che, per quanto approfonditi, sono limitati dalla grande quantità di parametri in gioco, dalla specificità dell'applicazione e dalla strumentazione.

Al di là di valori di riferimento in letteratura e della sensibilità dell'operatore, mancano inoltre criteri precisi per stabilire i parametri di acquisizione ed eccitazione a seconda della tipologia di materiale in esame: gli unici documenti in cui sono indicate delle linee guida sono un articolo di Marinetti [36] e la tesi di dottorato di Ibarra-Castanedo [14].

La continua proposta di metodi di inversione dei dati, cioè di procedure per il calcolo delle caratteristiche del difetto, prova infine come si sia ancora lontani dall'individuare un criterio che combini accuratezza e velocità di calcolo e non necessiti di lunghe fasi di taratura e di determinazione sperimentale di coefficienti. In questo senso sono interessanti quegli studi che effettuano un confronto diretto tra le numerose procedure, come la tesi di Larsen ([16]).

Ultimo problema aperto è la ripetibilità della procedura sperimentale, facilmente influenzabile da fattori esterni e dall'utilizzo scorretto dell'apparato.

2.5 Stato dell'arte ThermALab

La branca dei controlli non distruttivi al ThermALab è stata finora sviluppata con quattro lavori di tesi. Gasparri [11] presenta un'analisi analitica del fenomeno, considerando le tecniche LT, PPT e PPT multi-impulso. La campagna sperimentale su provini di Plexiglas® spessi 2cm evidenzia i vantaggi della PPT e permette l'identificazione di fori con diametro maggiore di 5mm e profondità fino a 4mm. Piu [12] si è concentrato sull'analisi del rumore e della riflettanza ai fini di effettuare prove LT. Gutiérrez Fajardo [13] ha approfondito le tecniche di trattamento dell'immagine, in particolare l'analisi *blob* e le tecniche di segmentazione per la stima del diametro, e proposto il criterio della massima correlazione per la stima della profondità del difetto. Casetta [15] infine ha proposto il metodo della superficie di risposta per il raffinamento dell'identificazione del difetto, oltre ad un'ulteriore confronto tra modelli teorici, numerici e risultati sperimentali.

2.6 Obiettivi del presente lavoro

Questo lavoro si propone di studiare i limiti della tecnica su provini sottili, la cui zona *sound* presenta riflessioni del fondo allontanandosi dal comportamento tipico del mezzo semi infinito, e di definire i parametri per lo studio su altri materiali grazie a modelli numerici validati sui dati sperimentali ottenuti con nuove campagne di prove.

Capitolo 3

Basi teoriche

Le fondamenta per lo studio dei controlli non distruttivi risiedono nella teoria della conduzione termica, che spiega la propagazione del calore in un mezzo materiale senza trasporto macroscopico di massa in termini di flusso termico areico \mathbf{q} e temperatura T , ed è formalizzata dalla legge di Fourier

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla T \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

dove \mathbf{K} è la conduttività termica del materiale, ed è uno scalare (k) nel caso di materiali omogenei ed isotropi, un tensore in mezzi anisotropi. \mathbf{K} dipende tipicamente dalla temperatura, ma in molte applicazioni pratiche le variazioni di temperatura cui è sottoposto il materiale in esame consentono di considerarla una costante. Il segno negativo nell'equazione rappresenta il fatto che il calore fluisce in direzione opposta al gradiente di temperatura, cioè dalle zone calde a quelle fredde, essendo \mathbf{K} sempre positiva.

Questa legge costitutiva, sostituita nell'equazione del bilancio dell'energia, permette di ricavare l'equazione della diffusione termica, la cui soluzione fornisce il campo di temperatura. Per un materiale omogeneo ed isotropo si ottiene

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

α è la *diffusività termica*, misura dell'attitudine del materiale a condurre energia rispetto alla tendenza ad immagazzinarla, cioè a trasmettere variazioni di temperatura, ed è definita

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (3.3)$$

3.1 Onde termiche

Se lo stimolo termico è una funzione armonica del tempo, è possibile analizzare il problema utilizzando il formalismo della teoria delle onde, come confermato dall'evidenza sperimentale [28]. Ciò consente non solo di trattare, grazie alla *serie* di Fourier, sollecitazioni termiche periodiche, ma anche quelle aperiodiche purché limitate nel tempo, ricorrendo alla *trasformata* di Fourier.

3.1.1 Soluzione 1D

Senza perdere generalità e favorendo la comprensione, si considera l'equazione di Fourier per geometria piana nel caso monodimensionale:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.4)$$

è dimostrabile che la sua soluzione può essere espressa come

$$T(z, t) = \tilde{T}(z)e^{j(\omega t - \varphi)} \quad (3.5)$$

dove $\tilde{T}(z)$ è una funzione complessa indipendente dal tempo. Sostituendo la 3.5 nella 3.4 si ottiene l'equazione differenziale ordinaria di secondo ordine

$$\frac{d^2 \tilde{T}}{dz^2} - \frac{j\omega}{\alpha} \tilde{T} = 0 \quad (3.6)$$

che ha per soluzione la somma di due termini esponenziali

$$\tilde{T}(z) = A_1 e^{-z\sqrt{j\omega/\alpha}} + A_2 e^{z\sqrt{j\omega/\alpha}} \quad (3.7)$$

di cui si conserva solo il primo termine, ponendo nulla A_2 per la necessità di mantenere la soluzione limitata nel dominio. La soluzione può essere espressa in modo più rappresentativo della fisicità del fenomeno introducendo la *lunghezza termica di diffusione*

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad [m] \quad (3.8)$$

che esprime la misura di quanto in profondità un'onda termica di determinata frequenza può penetrare in modo efficiente, dal momento che per $z = \mu$ l'ampiezza è attenuata di un fattore $1/e$. Sostituendo questa definizione nella

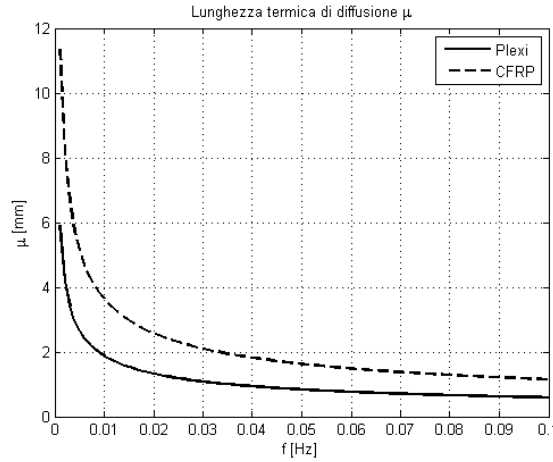


Figura 3.1: Lunghezza termica di diffusione

3.7, considerando la sola parte reale, otteniamo dalla 3.5 l'andamento della temperatura in funzione dello spazio e del tempo.

$$T(z, t) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(2\pi ft - \frac{z}{\mu} - \varphi\right) \quad (3.9)$$

Per i nostri scopi, è utile sottolineare che onde a frequenza più bassa penetrano più in profondità. Lo studio del caso tridimensionale con sorgente puntiforme effettuato in [78] porta ad analoghe considerazioni.

3.1.2 Riflessione e trasmissione

È sperimentalmente provato (vedi [28]) che le onde termiche si propagano fra mezzi eterogenei in accordo con la *legge di Snell*, purché la lunghezza d'onda sia molto maggiore della rugosità dell'interfaccia. Per comprendere il fenomeno, si consideri un'onda termica piana incidente con angolo θ_i su un'interfaccia posta a $z = 0$ e con normale parallela all'asse z . Si può scomporre l'onda in due componenti, una diretta come z , ed una come l'asse x , ad esso perpendicolare:

$$\tilde{T}(x, z) = Ae^{-\beta x \sin \theta_i} + Ae^{-\beta x \cos \theta_i} \quad (3.10)$$

L'onda incidente, giunta all'interfaccia, si scompone a sua volta in un'onda riflessa nel mezzo 1 ed una trasmessa nel mezzo 2:

$$\tilde{T}_1(x, z) = Ae^{-\beta_1(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} + \hat{r} Ae^{-\beta_1(x \sin \theta_r + z \cos \theta_r)} \quad (3.11)$$

$$\tilde{T}_2(x, z) = \hat{t} Ae^{-\beta_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (3.12)$$

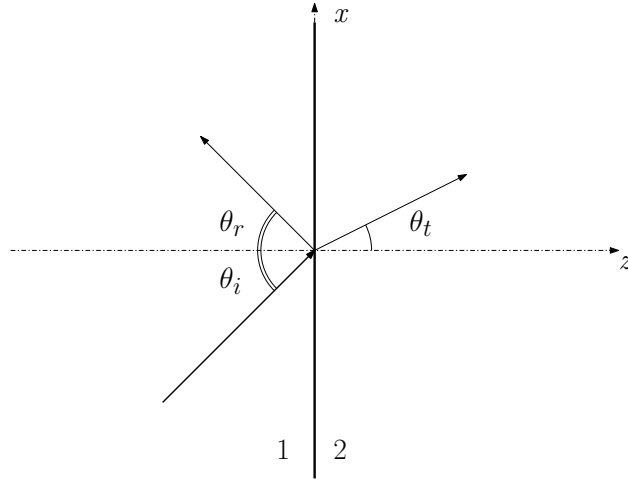


Figura 3.2: Legge di Snell

La componente diretta come l'asse x non risente dell'interfaccia, deve quindi mantenere costante il numero d'onda.

$$\kappa_{x,i} = \frac{1}{\ell_1} \sin \theta_i = \frac{1}{\ell_1} \sin \theta_r = \kappa_{x,r} \quad (3.13)$$

$$\kappa_{x,i} = \frac{1}{\ell_1} \sin \theta_i = \frac{1}{\ell_2} \sin \theta_t = \kappa_{x,t} \quad (3.14)$$

Uguagliando le due espressioni si ottengono le già citate *leggi di Snell* per le onde termiche:

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\alpha_1}} \sin \theta_i = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2}} \sin \theta_t \quad (3.16)$$

Infine rimangono da determinare le espressioni dei *coefficienti di riflessione e trasmissione*, che si ottengono imponendo l'uguaglianza fra temperatura e flusso termico nel punto di interfaccia:

$$\tilde{T}_1 = \tilde{T}_2 \quad (3.17)$$

$$k_1 \frac{\partial \tilde{T}_1}{\partial n} = k_2 \frac{\partial \tilde{T}_2}{\partial n} \quad (3.18)$$

I coefficienti risultano essere

$$\hat{r} = \frac{e_1 \cos \theta_i - e_2 \cos \theta_t}{e_1 \cos \theta_i + e_2 \cos \theta_t} \quad (3.19)$$

$$\hat{t} = \frac{2e_2 \cos \theta_t}{e_1 \cos \theta_i + e_2 \cos \theta_t} \quad (3.20)$$

dove e_1 ed e_2 sono le *effusività termiche* dei due mezzi, definite come

$$e = \sqrt{k\rho c} \left[\frac{W s^{1/2}}{m^2 K} \right]$$

Di particolare interesse è il caso in cui l'onda incidente è normale all'interfaccia, caso in cui risulta

$$\hat{r} = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (3.21)$$

$$\hat{t} = \frac{2e_2}{e_1 + e_2} \quad (3.22)$$

Nella tabella sottostante si riportano due valori significativi di tali coefficienti: nel caso dell'interfaccia tra plexiglas ed aria, che caratterizza un difetto con foro, si può con buona approssimazione ritenere che tutta l'onda incidente venga riflessa. Nel caso di un'inclusione di teflon in un materiale composito ed in assenza di delaminazioni, usato in più studi per simulare difetti interni, il più basso coefficiente di riflessione rende la rilevazione del difetto più problematica, rendendo necessari stimoli termici maggiori.

Tabella 3.1: Coefficienti di riflessione e trasmissione

mezzo 1/2	\hat{r}	\hat{t}
PMMA/aria	0.98	0.02
CFRP/teflon	0.24	0.76

3.1.3 Riflessione dell'onda 1D

Sulla base delle considerazioni del paragrafo precedente e della soluzione per l'onda termica 1D (eq. 3.9), possiamo ipotizzare di avere una lastra che presenta un'interfaccia posta ad una profondità L caratterizzata da un coefficiente di riflessione \hat{r} . Imponendo sulla superficie un campo di temperatura armonico del tipo

$$T(0, t) = T_0 \cos(2\pi ft - \varphi) \quad (3.23)$$

la temperatura rilevata sulla superficie stessa presenterà un contributo dovuto all'onda riflessa, caratterizzato da un'attenuazione ed uno sfasamento funzione della profondità dell'interfaccia: questa proprietà è la base su cui si fondano i metodi per il calcolo della profondità dei difetti.

$$T(0, t) = T_0 \cos(2\pi ft - \varphi) + \hat{r}T_0 e^{-2L/\mu} \cos\left(2\pi ft - \frac{2L}{\mu} - \varphi\right) \quad (3.24)$$

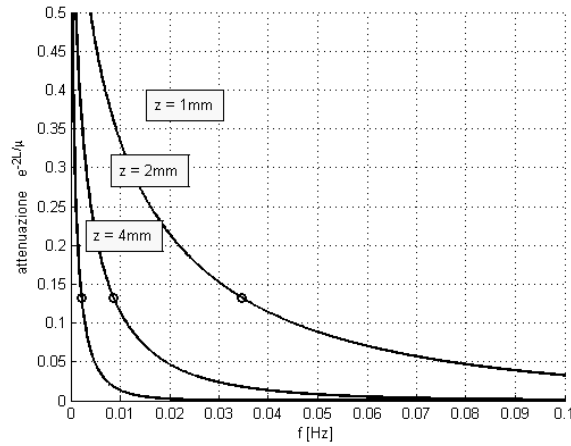


Figura 3.3: Attenuazione dell'onda riflessa 1D, varie profondità

I punti evidenziati in figura sono posti in corrispondenza della frequenza associata alla lunghezza termica di diffusione del difetto.

3.2 Risposta all'impulso

Considerando un solido semi infinito con approssimazione monodimensionale, tale per cui le superfici isoterme sono piani paralleli alla superficie esterna, la soluzione analitica della risposta ad un impulso termico applicato uniformemente sulla sua superficie è, secondo [78]:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho C_p \pi t}} e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} \quad (3.25)$$

Il nostro interesse è rivolto alla temperatura superficiale: per $z = 0$ la (3.25) può essere più semplicemente riscritta come

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (3.26)$$

In figura 3.4, si può apprezzare la differenza tra il comportamento teorico per una lastra semi infinita e quello misurato in una lastra di plexiglass di dimensione finita, ma sufficientemente profonda da poter considerare trascurabile il contributo dato dalle onde riflesse.

3.2.1 Riflessioni multiple, modello difetto 1D

L'applicazione diretta della (3.25) consente una prima stima dell'effetto di multiple riflessioni delle onde termiche in un corpo di dimensioni finite ed

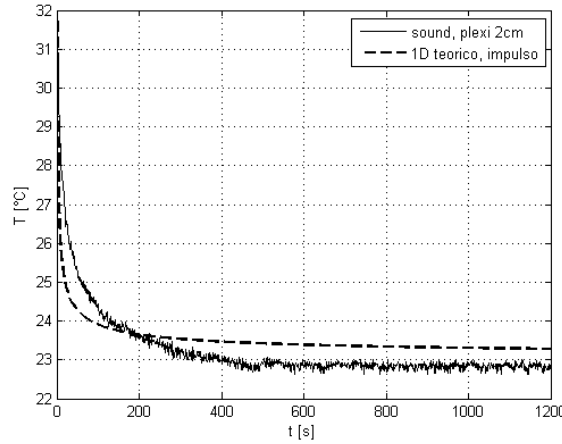


Figura 3.4: Transitorio di raffreddamento, misurato (lastra 2cm, impulso 20s) e teorico

uno studio sui difetti basato sul confronto con il mezzo semi infinito:

$$T(0, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho C_p \pi t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \hat{r}^n e^{-\frac{n^2 L^2}{\alpha t}} \right] \quad (3.27)$$

Come dimostrato in [26], tuttavia, il modello 1D è accettabile per una lastra sottile lontano da difetti, mentre in loro presenza non è sufficiente per prevedere l'andamento delle temperature.

3.2.2 Modello assialsimmetrico

In [26] è proposto un modello basato sul *principio di Huygens*, secondo il quale ogni punto di un fronte d'onda può essere visto come sorgente di un'onda in fase con la prima, ed ogni fronte d'onda può essere visto come l'involuppo delle onde generate dai punti attraversati in precedenza. Nel caso in esame, è possibile quindi ritenere che il campo di temperatura sulla superficie del provino sia dato dalla somma della soluzione del problema del riscaldamento su lastra semi infinita con il contributo della riflessione del difetto, visto come insieme di punti di generazione di onde.

Consideriamo quindi una lastra scaldata da un flusso periodico ed uniforme a $z = 0$. Il problema termico è retto dall'equazione

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.28)$$

con condizione a contorno di *Von Neumann* sulla superficie

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q \cdot \exp(j\omega t) \quad (3.29)$$

Usando la tecnica di separazione delle variabili, la soluzione generale è

$$T(z, t) = \frac{q}{k\sigma} \cdot \exp(-\sigma z) \cdot (j\omega t) \quad (3.30)$$

Supponiamo ora di avere un difetto circolare di raggio a ad una profondità z , parallelo alla superficie eccitata e tale per cui la riflessione delle onde termiche è completa, ipotesi in accordo con il valore del coefficiente di riflessione per interfaccia solido/aria. Lo stimolo termico è un impulso uniforme al tempo $t = 0$. Si opera inizialmente nel dominio delle frequenze, in modo da semplificare l'operazione di convoluzione fra la soluzione relativa alle onde riflesse e quella del mezzo semi infinito, che fornisce la soluzione completa. Disponendo della soluzione relativa alla sorgente puntiforme [78]

$$\bar{T}(x, \omega) = \frac{\exp(-\sigma R)}{R} \quad (3.31)$$

e ricordando che, secondo il *principio di Huygens*, ogni punto del difetto può essere visto come sorgente puntiforme delle onde riflesse, la soluzione è data dalla convoluzione della 3.30 con la 3.31 integrata sulla superficie del difetto:

$$\bar{T}(x, \omega) = \left[1 + \frac{2\sigma}{\pi} \cdot \exp(-\sigma z) \cdot \int_0^a \int_0^\pi \frac{\exp(-\sigma R)}{R} r d\theta dr \right] \frac{q}{k\sigma} \quad (3.32)$$

La soluzione trasformata nel dominio del tempo, sfruttando la trasformata inversa di Fourier

$$T(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \bar{T}(x, \omega) \cdot \exp(-j\omega t) d\omega \quad (3.33)$$

risulta essere

$$T(x, t) = \frac{2q}{\pi k} \int_0^a \int_0^\pi \frac{\exp\left(-\frac{(z+R)^2}{4\alpha t}\right)}{2\sqrt{\pi\alpha t^3}} \cdot \frac{r+R}{R} r d\theta dr \quad (3.34)$$

Questa equazione può essere integrata numericamente per ottenere l'evoluzione del campo di temperatura lungo l'asse x .

Il nostro interesse è altresì focalizzato sull'evoluzione della temperatura superficiale, ed in particolare sul contrasto tra la zona difettata e la zona *sound*. La 3.34, valutata per $x = 0$ ed integrata, permette una stima del contrasto massimo, al centro del difetto, in funzione del diametro e della profondità del difetto stesso:

$$\Delta T(x = 0, t) = \frac{q}{e\sqrt{\pi t}} \left[\exp\left(-\frac{z^2}{\alpha t}\right) - \exp\left(-\frac{(z + \sqrt{a^2 + z^2})^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad (3.35)$$

3.3 Trasformata di Fourier

Le tecniche NDT basate sull'analisi in frequenza hanno dimostrato una minore sensibilità alle disuniformità di eccitazione termica ed in generale una migliore accuratezza nel caratterizzare difetti, già dai primi lavori pubblicati a riguardo [35]. L'analisi in frequenza è possibile grazie alla *trasformata di Fourier*, definita per una generica funzione del tempo $f(t)$ come

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.36)$$

dove j è l'unità immaginaria. Questa formulazione è utilizzata per lo studio analitico. Per i segnali campionati, del tipo

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n\tau)\delta(t - n\tau) \quad (3.37)$$

si opera invece con la *trasformata discreta di Fourier* (DFT)

$$F_s(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n\tau)e^{-j\omega n\tau} \quad (3.38)$$

Il risultato di questa operazione è costituito da N coefficienti complessi, pari ai punti di campionamento:

$$F_s = Re_s + Im_s \quad (s = 0, 1, \dots, N) \quad (3.39)$$

dai quali si ottengono il *modulo* o *ampiezza* e la *fase*:

$$A_s = \sqrt{Re_s^2 + Im_s^2} \quad \phi_s = \tan^{-1} \frac{Im_s}{Re_s} \quad (3.40)$$

Una proprietà della trasformata di segnali reali, quale il valore di temperatura, è la *simmetria hermitiana*, cioè simmetria complessa coniugata. Ciò significa che la parte reale ed il modulo sono simmetrici rispetto l'origine (funzioni *pari*), la parte immaginaria e la fase sono antisimmetriche (funzioni *dispari*). Sul lato pratico, quanto detto implica che, acquisiti N termogrammi, in seguito alla trasformata avremo a disposizione $N/2 + 1$ immagini di fase e ampiezza, compresa quella a frequenza zero che non contiene informazioni utili.

3.4 Riscaldamento impulsivo, trasformata

Senza scendere in dettaglio sulla definizione e le proprietà della funzione generalizzata $\delta(t)$, ampiamente trattata in [84], l'impulso è una forma di eccitazione particolarmente interessante nelle analisi in frequenza in quanto ha ampiezza costante per ogni valore di frequenza:

$$\Delta(f) = \mathcal{F}[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega t} \Big|_{t=0} = 1 \quad (3.41)$$

Nella pratica, $\delta(t)$ non descrive adeguatamente lo stimolo fornito da lampade, che necessitano di qualche secondo per scaldare adeguatamente il provino. In prima approssimazione, si considera come sorgente un segnale rettangolare di durata τ ed ampiezza q_0 definito come

$$q(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ q_0 & 0 < t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases} \quad (3.42)$$

La sua trasformata è (vedi appendice A)

$$Q(f) = q_0 \tau \frac{\sin(\pi \tau f)}{\pi \tau f} e^{-j\pi \tau f} \quad (3.43)$$

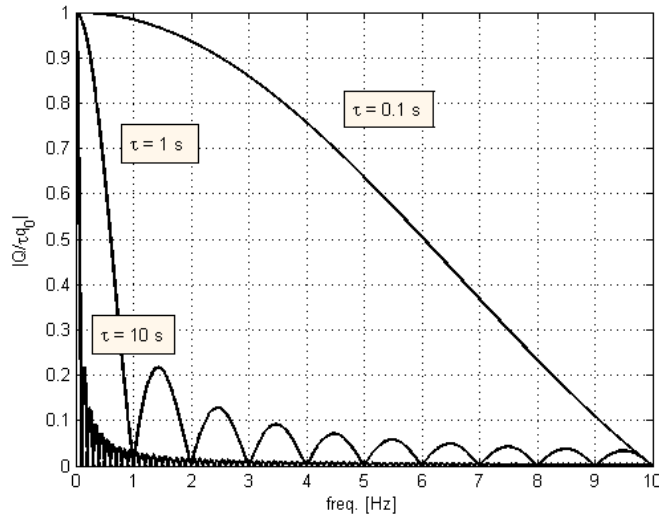


Figura 3.5: Spettro di ampiezza normalizzato per vari impulsi

Si nota come ad una durata maggiore dell'impulso corrisponde una banda minore di frequenze eccitate: questo comportamento è utile ai nostri fini in quanto le onde ad alta frequenza costituiscono principalmente rumore.

La frequenza in corrispondenza della quale si ha il primo zero della funzione è $1/\tau$, mentre per $1/(\tau/2)$ l'attenuazione in ampiezza è 0.63.

Capitolo 4

Apparato e procedure sperimentali

La termografia pulsata con analisi di fase mira a individuare difetti non superficiali e quantificarne dimensione e profondità attraverso l'analisi in frequenza di una serie di termogrammi.



Figura 4.1: Schema concettuale della PPT

Un'analisi PPT è composta da diverse fasi, ognuna delle quali è determinante per la buona riuscita del test ed è possibile terreno per il suo perfezionamento.

4.1 Eccitazione

Lo stimolo termico è fornito mediante due lampade alogene da $500W$, montate su una struttura in legno dotata di otturatore a ghigliottina per ottenere un impulso quanto più possibile rettangolare. Fissata la potenza, l'unico parametro su cui si può operare è la durata τ dell'impulso, che deve essere scelto sia in base alle considerazioni del paragrafo 3.4 sulla banda di frequenze da eccitare, sia considerando che l'energia depositata $E = q_0\tau$ deve



Figura 4.2: lampada alogena e otturatore

essere tale da garantire che la differenza di temperatura tra la zona difettata e la zona *sound* sia rilevabile dalla termocamera. A titolo di esempio si riportano i salti di temperatura registrati su un provino intonso di plexiglas al termine di vari impulsi.

Tabella 4.1: salti iniziali di temperatura superficiale, lastra plexi 2 cm

τ [s]	ΔT [°C]
20	11.43
10	5.6
5	4.4
3	2.65

4.2 Termocamera

La termocamera è una Raytheon Radiance HS, dotata di una matrice di 256×256 sensori di antimoniuro di indio (InSb) posti nel piano focale dell'obiettivo (Focal Plane Array, FPA), ognuno dei quali corrisponde ad un pixel. Il sensore lavora a temperatura criogenica, ottenuta grazie ad un sistema di raffreddamento che opera con ciclo Stirling. La risposta spettrale è compresa fra 3 e 5 μm , banda nota come *Mid-Wavelength Infrared* (MWIR) ed indicata in [1] come ideale per questo tipo di prove. Il controllo della termocamera



Figura 4.3: Termocamera Raytheon Radiance HS

tramite computer è reso possibile da un collegamento seriale, mentre l'acquisizione delle immagini avviene per mezzo di un cavo parallelo e una scheda di acquisizione (*frame grabber*).

4.3 Acquisizione

L'acquisizione delle termografie è regolata dai seguenti due parametri:

4.3.1 Frequenza di campionamento

La *frequenza di campionamento* f_c , è il reciproco del tempo trascorso tra un termogramma ed il successivo: $f_c = 1/\Delta t$. Secondo il *teorema del campionamento di Nyquist-Shannon*, un segnale a banda limitata dalla frequenza f_M può essere ricostruito a partire dai suoi campioni se vale la condizione $f_c > 2f_M$. I difetti più superficiali vengono identificati da onde corte ad alta frequenza: la frequenza di campionamento deve essere quindi sufficientemente rapida da garantire l'assenza di *aliasing* per la massima frequenza di interesse. È provato in [14] che la distorsione di $\Delta\phi$ causata dall'errore di aliasing non è direttamente proporzionale alla frequenza di campionamento ma è trascurabile per alte f_c e cresce rapidamente al diminuire delle stesse.

4.3.2 Tempo di osservazione

Il tempo di osservazione t_{oss} determina la *risoluzione* in frequenza, secondo la relazione $\Delta f = 1/t_{oss}$. La formula della lunghezza termica di diffusione

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (4.1)$$

è la base per il calcolo della profondità del difetto: dalla figura 4.4 si nota come la risoluzione in frequenza è un parametro critico per la possibilità di individuare precisamente i difetti più profondi, ed è necessario tenerne conto nell'impostazione del t_{oss} , che è dettato anche dalla durata del transitorio e dalla memoria disponibile, nel caso di acquisizioni ad alte frequenze.

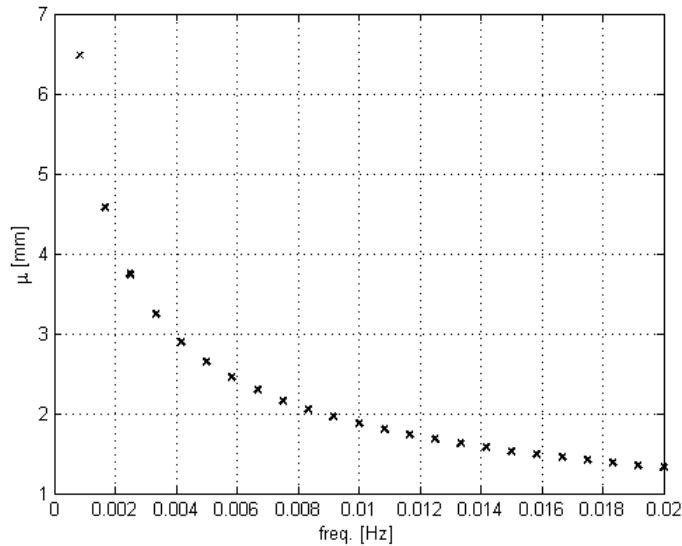


Figura 4.4: valori di μ , plexiglas® , t_{oss} 20 minuti

Altro aspetto critico da tenere in considerazione è il *rippling*, fenomeno che consiste in piccole oscillazioni della trasformata dovute all'applicazione di una finestra di campionamento finita: maggiore la durata della finestra, minore il disturbo in questione. Nel nostro caso, le finestre utilizzate per i provini disponibili consentono di trascurare questa problematica. Un'analisi dettagliata dei problemi legati all'acquisizione è presente in [14], va sottolineato che la taratura precisa dei parametri di acquisizione diventa un fattore tanto più critico quanto più è conduttivo il provino e, quindi, più veloce il fenomeno da osservare.

4.3.3 Taratura e calibrazione

La termocamera fornisce come output i valori di lettura dei sensori: per avere informazioni sulla temperatura è necessario operare una taratura mediante un corpo nero di cui sia nota la temperatura ed impostare il valore atteso di emissività (figura 4.5).

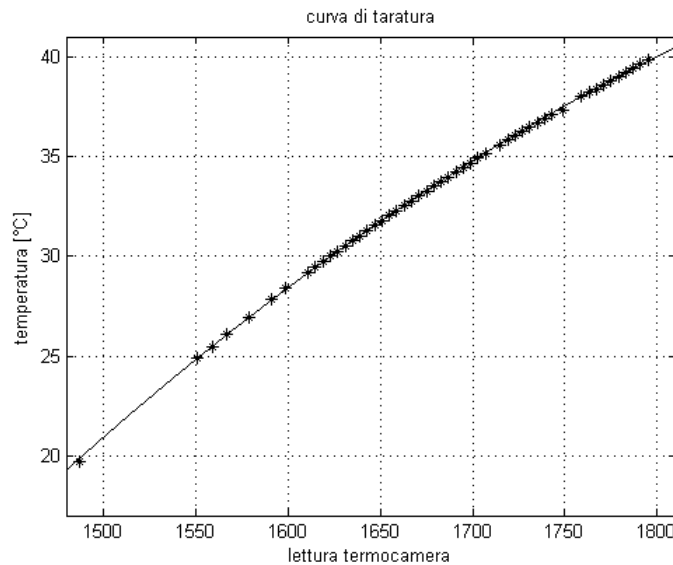


Figura 4.5: Curva di taratura della termocamera

Altrettanto importante è la procedura di calibrazione, che permette di impostare il tempo di integrazione in relazione al campo di temperatura previsto (vedi [17]): l'errore di misura in caso di calibrazione non accurata può aumentare di oltre tre volte (figura 4.6).

4.4 Fast Fourier Transform (FFT)

L'applicazione di un algoritmo basato sull'applicazione diretta della DFT (eq. 3.38) porterebbe a tempi di calcolo dell'ordine $O(N^2)$. Gli algoritmi FFT consentono di velocizzare il processo, tipicamente attraverso fattorizzazioni di N , effettuando la trasformazione con numero di operazioni $O(N \log N)$. Matlab® utilizza l'algoritmo FFTW [82], sviluppato al MIT da Frigo e Johnson. Tale algoritmo è particolarmente efficiente se si usano vettori la cui dimensione N è potenza di due, lo è quasi altrettanto se N ha bassi fattori primi ed è diverse volte più lento quando N ha fattori primi più alti.

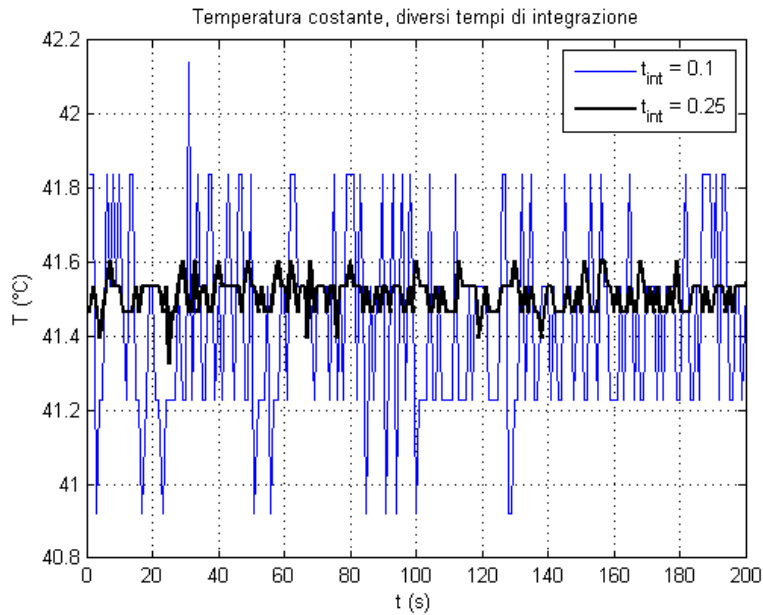


Figura 4.6: Rumore a temperatura costante, diversi tempi di integrazione

4.5 Trattamento delle immagini

Le immagini termografiche e le immagini di fase necessitano di trattamenti finalizzati a ridurre il rumore, che le renderebbe difficilmente utilizzabili nel processo di analisi.

Nel caso più generale, distorsioni radiometriche possono essere causate da molteplici fattori, quali irregolarità della superficie del provino, riflessioni della luce ambientale, risposta dello strumento non uniforme sullo spettro delle frequenze. Per limitare i disturbi esterni, le prove sono svolte in una camera oscura o in ambiente a luci spente su provini accuratamente ricoperti con vernice nera opaca ad alta ed uniforme emissività e bassa riflettività. Il metodo stesso dell'analisi di fase è studiato proprio per la sua virtù di essere meno sensibile a disuniformità di riscaldamento ed emissione. Rimangono quindi due principali tipi di rumore che affliggono le misure termografiche, illustrati nei prossimi sottoparagrafi.

4.5.1 Crazy pixel, filtro mediano

I *crazy pixel* sono disturbi che riguardano un singolo pixel dell'immagine (figura 4.8), che assume un valore nettamente diverso da quelli adiacenti per errori o malfunzionamenti momentanei del singolo sensore della termocamera. Un

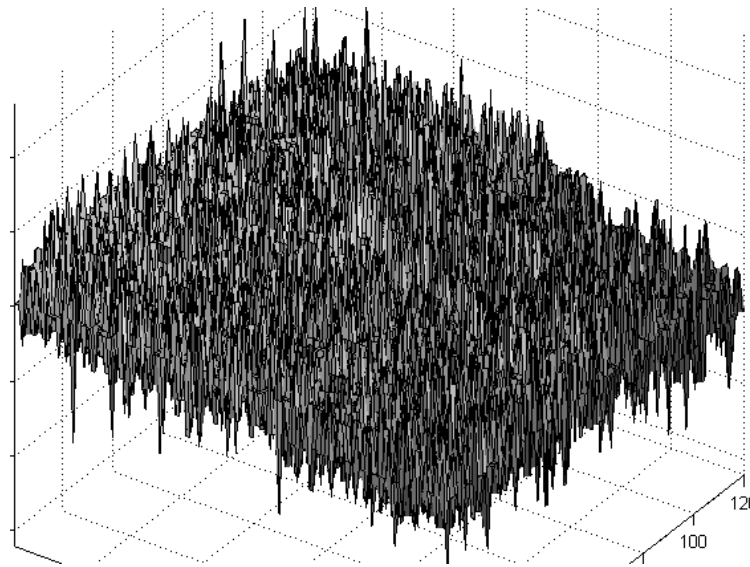


Figura 4.7: Termografia, visualizzazione 3D

modo efficace per eliminarli è l'applicazione di un filtro mediano, che consiste nella sostituzione di ciascun pixel con il mediano dei valori nell'intorno.

$$\begin{bmatrix} 8 & 10 & 9 \\ 11 & \boxed{120} & 9 \\ 9 & 13 & 8 \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} 8 & 10 & 9 \\ 11 & \boxed{9} & 9 \\ 9 & 13 & 8 \end{bmatrix}$$

Valore dei pixels : 8 8 9 9 $\boxed{9}$ 10 11 13 120
 Valore mediano : 9

4.5.2 Rumore ad alta frequenza, filtro gaussiano

Questo tipo di rumore è tipico del sensore adoperato, ed è facilmente osservabile in figura 4.6. Essendo un rumore ad alta frequenza, lo si limita con l'applicazione di un filtro passa-basso: in [13] è proposto l'uso del filtro gaussiano, che opera eseguendo una convoluzione tra l'immagine da trattare ed una gaussiana bidimensionale, detta maschera, definita come:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

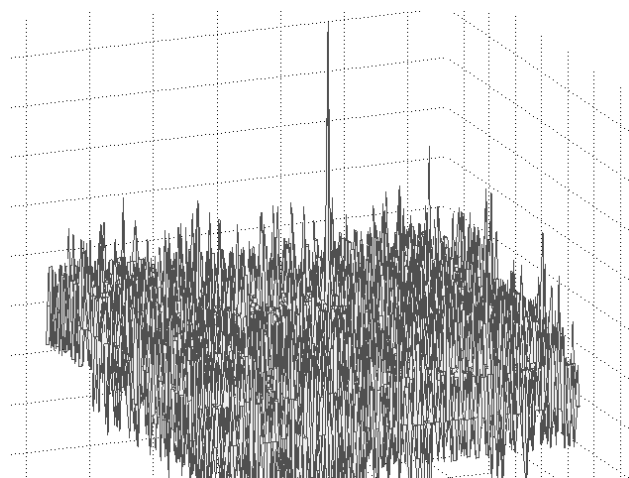


Figura 4.8: Un crazy pixel si staglia sullo sfondo

con σ deviazione standard della gaussiana, specificata dall'utente, al cui aumentare corrisponde un grado di smussamento maggiore dell'immagine. Sempre in [13] è proposta la regola per cui σ dovrebbe essere pari al raggio del difetto o, nel caso generale in cui il difetto è ignoto, al minimo raggio previsto.

4.6 Ricostruzione morfologica

I due metodi di filtraggio proposti migliorano notevolmente la qualità delle immagini termografiche e di quelle di fase, tuttavia non consentono un riconoscimento preciso della forma del difetto: a tal fine si ricorre all'applicazione sulle immagini di fase di filtri morfologici, oggetto di studio delle tesi precedenti ([13], [15]). Il procedimento si basa sulla segmentazione dell'immagine, cioè la sua suddivisione in regioni caratterizzate da minimi e massimi locali, ed operazioni di *dilatazione* ed *erosione*, che filtrano le piccole fluttuazioni e mettono in risalto le zone dell'immagine caratterizzate dai massimi valori della grandezza visualizzata, tipica dei difetti.

4.7 Stima della profondità, correlazione

In [13] e [15] è proposto come criterio per la determinazione della profondità del difetto l'individuazione della *frequenza di ottima visibilità* f_{opt} , cioè la frequenza alla quale il difetto appare come più nitido e definito. La determinazione automatica di tale frequenza si basa sul concetto di correlazione statistica, che nel caso di due immagini A e B , nel nostro caso immagini di

fase, è definita come

$$r(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^{righe\ colonne} \sum_{j=1}^{righe\ colonne} (A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{righe\ colonne} \sum_{j=1}^{righe\ colonne} (A_{ij} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_{i=1}^{righe\ colonne} \sum_{j=1}^{righe\ colonne} (B_{ij} - \bar{B})^2\right)}} \quad (4.2)$$

dove \bar{A} e \bar{B} sono le medie dei valori per ogni immagine. Ogni immagine di fase è quindi messa in correlazione con il suo successivo, ottenendo una funzione R

$$R = [r(\phi_1, \phi_2), r(\phi_2, \phi_3), \dots, r(\phi_{N/2-1}, \phi_{N/2})]$$

La f_{opt} si ottiene facendo la media tra le frequenze associate alle due immagini di fase aventi tra loro massima correlazione, tranne nel caso dei difetti più profondi, identificati dalle basse frequenze e caratterizzati da minor risoluzione: in questo caso f_{opt} corrisponde al picco di R. Si ricorda che per difetti profondi a piccole variazioni della frequenza corrispondono grandi differenze della profondità stimata. Tale stima si effettua con la formula

$$z_{opt} = C1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_{opt}}} \quad (4.3)$$

4.8 Calcolo del coefficiente C1

Il coefficiente che lega la profondità stimata con la lunghezza termica di diffusione si ottiene tramite taratura su un set di fori, con regressione lineare fra le lunghezze termiche di diffusione μ sperimentali e le profondità note dei fori test. Si impone il passaggio della retta di regressione per l'origine: per un difetto di profondità nulla si deve ottenere μ pari a zero.

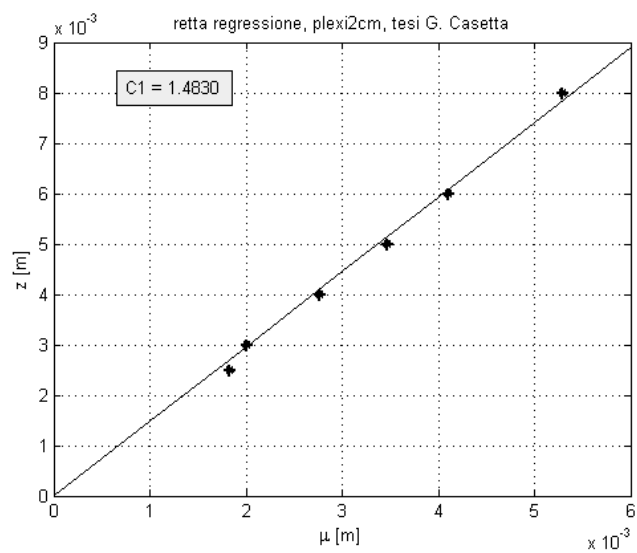


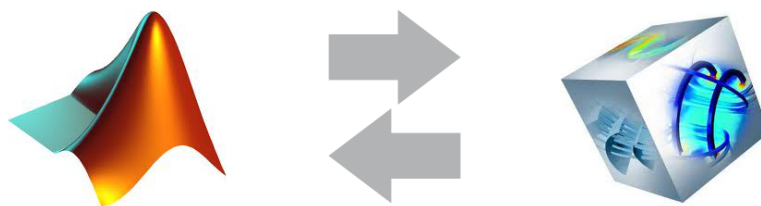
Figura 4.9: Regressione per il calcolo di C1

Capitolo 5

Analisi numerica

L'analisi numerica è uno strumento di fondamentale importanza nello studio delle tecniche termografiche, sia per prevedere l'esito degli esperimenti e valutare i metodi per la loro esecuzione che, una volta tarati i parametri, per uno studio sistematico molto più rapido di una campagna di prove.

Si utilizza il codice commerciale ad elementi finiti COMSOL® come software per l'analisi, in abbinamento con Matlab® per il trattamento dei dati. Questa scelta è dettata dalla facilità e velocità delle fasi di pre e post-processing e dalla robustezza del solutore. Per velocizzare ulteriormente le prove, sono stati sviluppati script Matlab® che, dati i parametri della lastra, del foro da esaminare, le condizioni iniziali ed al contorno e tutti gli altri parametri relativi alla procedura di prova già illustrati nel capitolo 4, avviano automaticamente l'analisi ad elementi finiti e mettono a disposizione dell'utente i risultati in un ambiente favorevole alla loro elaborazione.



I modelli utilizzati sono assialsimmetrici 2D, che per fori circolari e materiale omogeneo e isotropo assicurano rapidi tempi di calcolo e sono equivalenti ai modelli tridimensionali. Il raggio del provino è 5 cm, sufficientemente ampio per avere una zona a 4 cm da considerare *sound*, cioè riferimento per i calcoli delle variazioni di temperatura e fase in corrispondenza del difetto, supposto di raggio massimo 8 mm. Il risultato è costituito dai vettori di

temperatura $T_f(t)$ e $T_s(t)$ riferiti rispettivamente al centro del foro ed alla zona *sound*.

5.1 Lastra plexiglas 2 cm

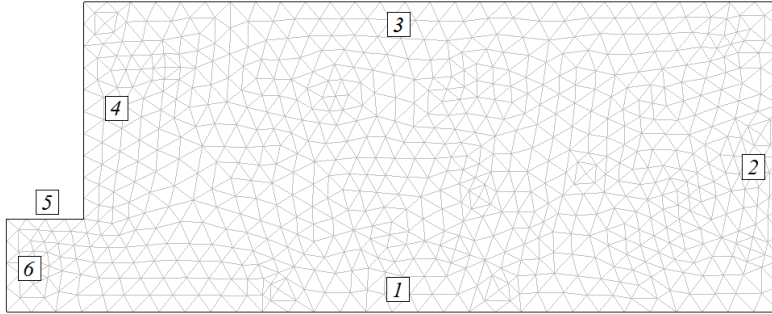


Figura 5.1: Mesh del modello plexi2cm con foro z6D10

La *mesh* ad elementi triangolari, impostata di default in COMSOL®), è considerata idonea all'analisi, sia per la validità della procedura automatica della sua generazione che per la facilità con cui si può infittire localmente nelle regioni caratterizzate dai maggiori gradienti di temperatura. Per i nostri scopi, è stato verificato che un raffinamento automatico garantisce un buon compromesso fra accuratezza dei risultati e tempi di calcolo.

Per quanto riguarda le condizioni a contorno, è stato sviluppato un modello adiabatico ed uno soggetto a scambio termico convettivo sui lati 1 e 3. I lati interni del foro rimangono adiabatici e simulano la riflessione completa dell'onda termica.

Tabella 5.1: Condizioni a contorno

Lato	1	2	3
Adiabatico	$\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T_3}{\partial z} = 0$
Convezione	$-k \frac{\partial T_1}{\partial z} = h [T_\infty - T_1]$	$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0$	$-k \frac{\partial T_3}{\partial z} = h [T_\infty - T_3]$
Impulso	$-k \frac{\partial T_1}{\partial z} = I$ per $t < t_I$		
	4	5	6
	$\frac{\partial T_4}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T_5}{\partial z} = 0$	$r = 0$
	$\frac{\partial T_4}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial T_5}{\partial z} = 0$	$r = 0$

5.1.1 Validazione

La validazione del modello è effettuata sulla zona *sound*: con condizioni a contorno adiabatiche si ottiene un buon accordo con il dato sperimentale.

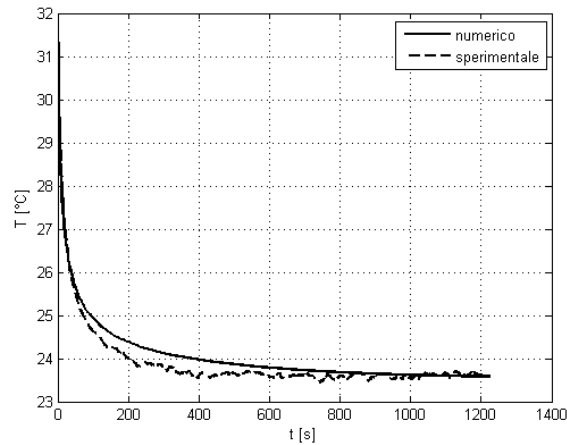


Figura 5.2: Transitorio di raffreddamento, numerico e sperimentale, impulso 20s

L'aggiunta della convezione ($h = 5W/m^2K$) non comporta differenze sostanziali, soprattutto nella zona iniziale di rapido raffreddamento della superficie che è la più critica ai fini dell'analisi di fase.

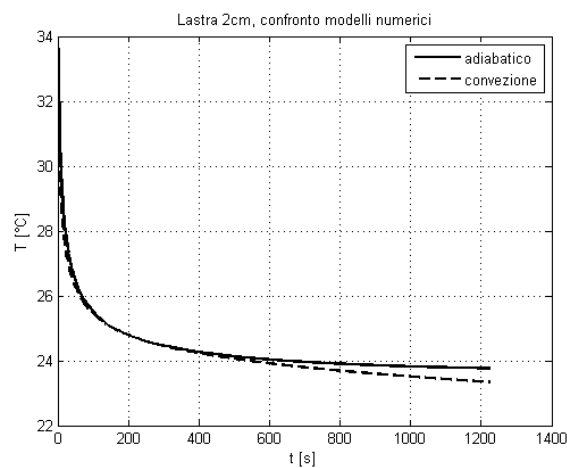


Figura 5.3: Transitorio di raffreddamento, confronto modelli numerici

5.2 Lastra plexiglas 4 mm



Figura 5.4: Mesh del modello plexi4mm con foro z2D8

La lastra di 4 mm pone alcuni problemi non riscontrabili in quella da 2 cm. Innanzi tutto la presenza non trascurabile dell'onda riflessa dal fondo, che va a ridurre il contrasto di temperatura con la zona difettata. A livello numerico l'assenza di rumore permette comunque una valutazione precisa del ΔT e del $\Delta \phi$, ma dal lato pratico c'è la necessità di calibrare attentamente la prova per riuscire ad individuare anche solo la presenza del difetto, oltre che la sua caratterizzazione. Altro aspetto di cui tenere conto è la durata dell'impulso: come si nota da figura 5.5, una durata maggiore deposita maggiore energia, ma lo spettro di ampiezza è concentrato sulle basse frequenze ed è distribuito in modo disomogeneo tra le medie frequenze, che caratterizzano i difetti più vicini alla superficie. Le condizioni a contorno sono analoghe a quelle illustrate in tabella 5.1.

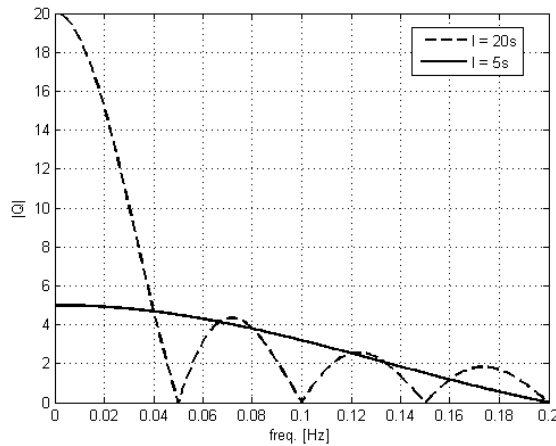


Figura 5.5: Spettro di ampiezza di diversi impulsi

5.2.1 Validazione

Come nel caso precedente, è stato realizzato un confronto tra un modello adiabatico ed uno sottoposto a convezione. I risultati sono però diversi: il

modello di lastra sottile non può prescindere da una condizione a contorno che ne consenta il raffreddamento, in quanto solo il modello con convezione approssima il comportamento fisico.

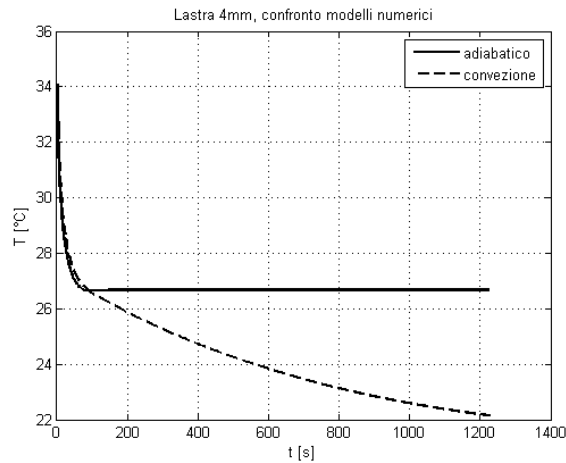


Figura 5.6: Transitorio di raffreddamento, confronto modelli numerici

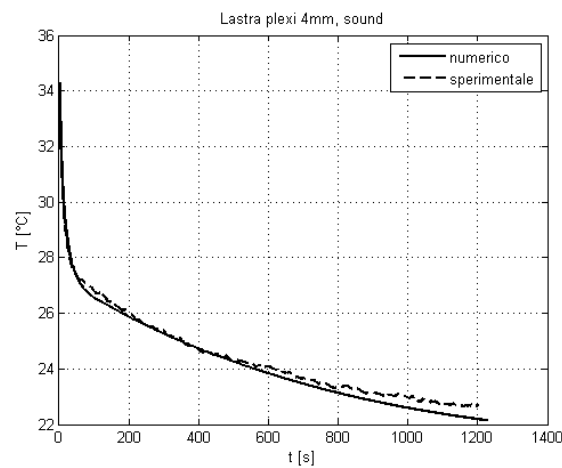


Figura 5.7: Transitorio di raffreddamento, numerico e sperimentale

Ricordando la figura 3.4, in cui si evidenzia come il raffreddamento di una lastra spessa 2cm segue il comportamento previsto dalla teoria per un mezzo semi infinito, si definisce *lastra sottile* una lastra il cui spessore sia tale per cui il suo raffreddamento in seguito ad impulso non sia correttamente approssimabile con tale modello.

5.3 Regressione automatica dei fori

Come visto nel capitolo 4, l'esito di una prova PPT è determinato da numerosi parametri. In tabella 5.2 sono elencati quelli definibili dall'utente, anche se le caratteristiche dell'impulso sono dettate parzialmente o totalmente dall'apparato, ad esempio se si utilizzano flash.

Tabella 5.2: Parametri PPT, definibili dall'utente

Impulso:	Potenza	I	[W]
	Durata	τ_I	[s]
Acquisizione:	Frequenza	f_c	[Hz]
	Durata	t_{oss}	[s]

In tabella 5.3 sono invece elencati i parametri che dipendono dall'oggetto della prova. In questa sezione si fa riferimento solo a materiali omogenei ed isotropi, per materiali ortotropi occorre impostare due valori di conduttività, uno parallelo ed uno perpendicolare al piano del provino: k_{\parallel} e k_{\perp} .

Tabella 5.3: Parametri PPT, provino

Provino:	Spessore	t	[m]
	Conduttività	k	[W/mK]
	Diffusività	α	[m ² /s]
Difetto:	Riflessione	$\hat{r}(e_1, e_2)$	[.]

Nel caso sperimentale, bisogna inoltre considerare tutti i parametri legati al trattamento dell'immagine, analizzati nel paragrafo 4.5 così come l'influenza delle condizioni di prova e dell'emissività superficiale dell'oggetto.

Nel capitolo 6 è illustrato per i singoli fori come il cambiamento di un singolo parametro comporta variazioni nel risultato, mentre nel paragrafo 4.8 come per valutare il legame tra μ e z_n sia necessaria una regressione su più fori. È stato quindi realizzato un programma che, impostati diametro e profondità di una serie di difetti, procede automaticamente alla loro analisi, al calcolo del coefficiente di regressione, alla valutazione dei risultati e, impostato un valore di soglia di sensibilità della termocamera, fornisce un'indicazione sulla possibilità della loro identificazione. In particolare, il calcolo della profondità è eseguito applicando la formula 4.3 utilizzando come frequenza caratteristica quella associata al picco di differenza di fase. L'output è una tabella analoga

alle 5.4 e 5.5. Le unità di misura sono *mm* per le dimensioni dei fori, *mHz* per le frequenze. La frequenza di acquisizione è pari a $1Hz$.

Tabella 5.4: Output regressione automatica, plexi 2cm

I [s]	τ_I [s]	Mat.	t	t_{oss}	C1	σ	CONV	Soglia
1250	20	plexi/aria	2cm	1200	1.077	0.785	SI	0.2
z	D	μ_n	z_{num}	err %	$\Delta\phi_{max}$	$f_{\Delta\phi_{max}}$	t_1	t_{end}
2	4	1.53	1.65	17.73	4.88	15.00	1	174
2	8	2.16	2.33	-16.35	13.42	7.50	1	361
2	12	2.29	2.47	-23.41	18.94	6.67	1	504
5	4	4.58	4.94	1.27	0.99	1.67	0	0
5	8	4.58	4.94	1.27	3.96	1.67	75	315
5	12	4.58	4.94	1.27	7.54	1.67	55	577
7	4	6.48	6.98	0.27	0.46	0.83	0	0
7	8	6.48	6.98	0.27	1.99	0.83	0	0
7	12	6.48	6.98	0.27	4.30	0.83	235	389

Tabella 5.5: Output regressione automatica, plexi 4mm

I [s]	τ_I [s]	Mat.	t	t_{oss}	C1	σ	CONV	Soglia
1250	20	plexi/aria	4mm	1200	1.284	0.537	SI	0.2
z	D	μ_n	z_{num}	err %	$\Delta\phi_{max}$	$f_{\Delta\phi_{max}}$	t_1	t_{end}
1	4	0.97	1.13	-13.19	7.38	37.5	1	81
1	6	1.02	1.20	-20.06	12.49	33.3	1	109
1	10	1.73	2.03	-102.93	17.83	11.7	1	189
2	4	1.62	1.90	5.09	4.87	13.3	1	90
2	6	1.80	2.11	-5.30	9.04	10.8	1	169
2	10	2.05	2.40	-20.06	15.75	8.3	1	379
3	4	2.05	2.40	19.96	2.03	8.3	29	52
3	6	2.16	2.53	15.63	4.19	7.5	14	128
3	10	2.29	2.68	10.52	7.77	6.6	10	480

Si nota come in tabella 5.4 compaiano dei fori aventi t_1 pari a zero, cioè non viene rilevata una differenza di temperatura foro-sound superiore alla sensibilità impostata. È inoltre interessante notare come la visibilità dei fori in questo modello non implichi necessariamente l'identificazione delle loro caratteristiche a livello sperimentale, fortemente influenzata dal rumore ad alta frequenza associato in particolare a lunghe eccitazioni.

Capitolo 6

Risultati

6.1 Analisi sperimentali

Sono state inizialmente eseguite 25 prove su lastre in plexiglas di 2 cm di spessore con fori di diverso diametro e profondità, finalizzate all'acquisizione della tecnica, alla conferma dei dati presentati nei lavori di tesi precedenti ([13] e [15]) ed al test di fori di diametro inferiore al più piccolo provato in precedenza (4 mm).

6.1.1 Procedura

Il risultato dell'acquisizione della termocamera è un file *.tiff* contenente le $t_{obs} \cdot \Delta t$ termografie in toni di grigio. In alcuni casi è possibile localizzare il difetto già in questa fase, anche se la presenza di rumore e crazy pixel rende difficoltosa l'identificazione del range di scalatura ottimale per la sua visualizzazione (figura 6.1).

Tabella 6.1: Parametri della prova, plexi 2 cm

I [W]	τ_I [s]	t_{obs} [s]	Δt [s]
2.500	20	1200	1

La semplice applicazione dell'analisi di fase evidenzia con grande efficacia i difetti facilmente riconoscibili, nelle frequenze prossime a quella di ottima visibilità (figura 6.2).

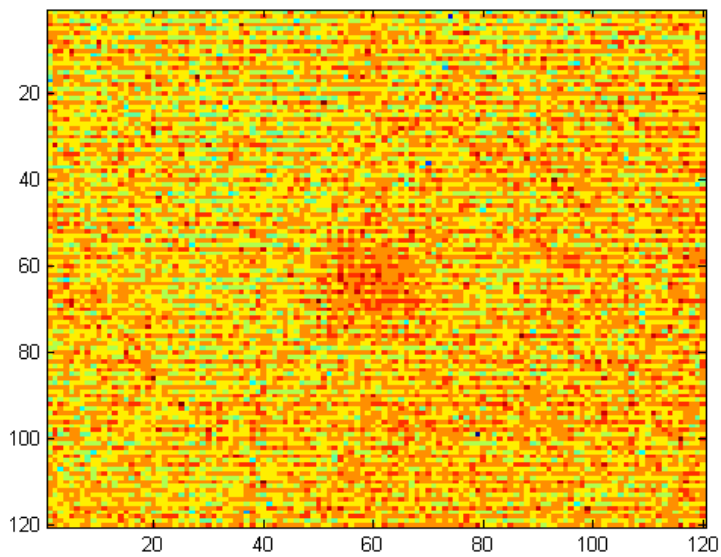


Figura 6.1: Termografia del foro D4z4, $t = 28s$

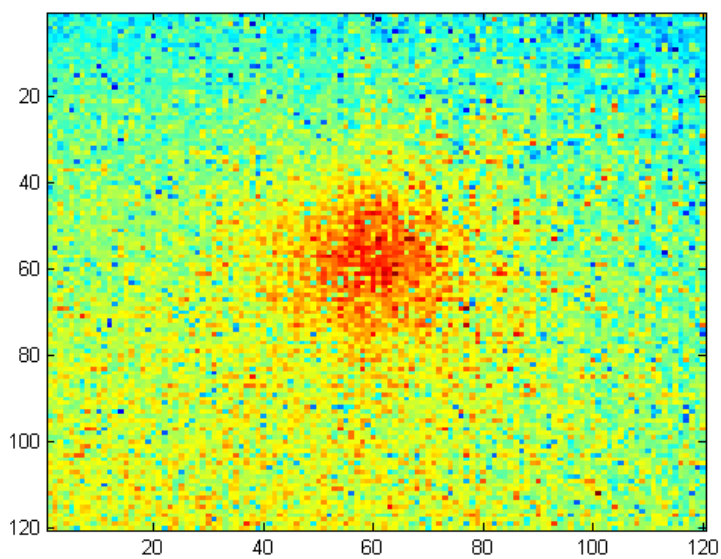


Figura 6.2: D4z4, Analisi di fase, $f = 1.667 \cdot 10^{-3}$ Hz

Sulle immagini di fase di interesse vengono quindi applicati i filtri mediano e gaussiano e la procedura di ricostruzione morfologica (figura 6.3).

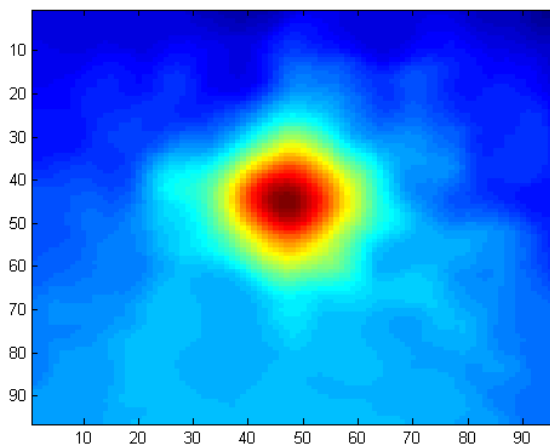


Figura 6.3: D4z4, filtrato, $f = 1.667 \cdot 10^{-3}$ Hz

Infine viene calcolata la correlazione, ne viene individuato il massimo e la frequenza corrispondente è utilizzata per il calcolo della profondità del difetto con la formula 4.3.

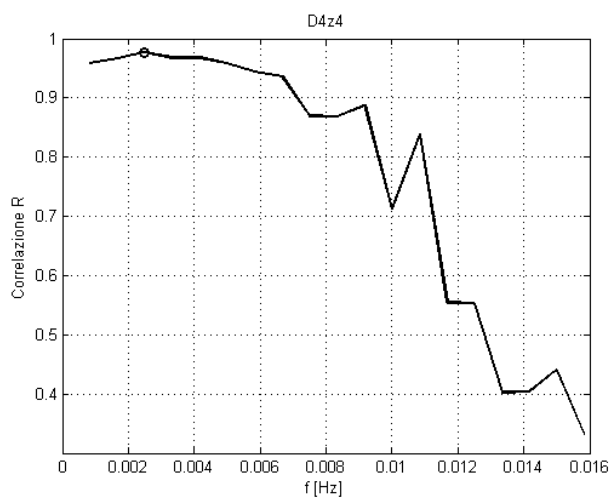


Figura 6.4: D4z4, correlazione

6.1.2 Lastra plexiglas 2 cm

I risultati confermano quanto riportato in [13] e [15], compresa l'attesa difficoltà nell'identificazione dei fori più piccoli o più profondi, quando il rapporto D/z è prossimo o inferiore all'unità. In particolare, al di sotto dei 2 mm di diametro la rilevazione avviene solo in una delle cinque prove, con profondità 2 mm, e la relativa stima della profondità è inattendibile.

Tabella 6.2: Fori 2cm, I20s, t_{obs} 1200s, $C1 = 1.48$

$D[mm]$	$z[mm]$	$z_{exp}[mm]$	err %
16	8	9.77	22
12	8	9.77	22
10	10	9.77	2.3
8	2.5	3.17	26.8
8	4	5.22	30.5
8	6	6.18	3
8	8	7.98	0.2
6	6	6.18	3
4	3	3.83	27.7
4	5	5.22	4.4
2	2	n.a.	n.a.
2	3	n.a.	n.a.

Si nota che l'errore per difetti profondi dipende principalmente dalla scarsa risoluzione a basse frequenze della lunghezza termica di diffusione, e che il metodo si dimostra sensibile per profondità comprese tra 2.5 mm e 10 mm e rapporto diametro/profondità maggiore di uno. I fori di diametro 2 mm vengono rilevati nel 50% delle prove ma il calcolo della loro profondità non fornisce risultati attendibili.

La *ripetibilità* dell'esperimento non è completa: l'errore più comune, presupponendo il corretto utilizzo dell'apparato (tempo di accensione delle lampade, azionamento delle ghigliottine, avviamento dell'acquisizione), consiste nella mancata identificazione della profondità dei difetti a causa del rumore, che si manifesta con un andamento irregolare della fase: in questo caso al difetto viene tipicamente associata la profondità relativa alla più bassa frequenza. Tale errore si manifesta prevalentemente su fori a profondità intermedie (6-8 mm). Manca allo stato attuale un'analisi sistematica in questo senso, anche in letteratura, a causa anche della lunga durata della singola prova. Sono state testate procedure di smoothing e di fitting polinomiale del segnale di temperatura nel tempo, ma le prime non portano benefici rilevanti a scapito

di un maggior tempo di calcolo, mentre le seconde causano sovente una decisiva perdita di informazione sul contrasto di temperatura e necessitano di ulteriori analisi per poter essere applicate in modo consistente.

6.1.3 Lastra plexiglas 4 mm

E' stata effettuata una campagna sperimentale su provino in plexiglas di spessore 4 mm per due valori di durata dell'impulso termico τ_I . I risultati sono riportati in tabella 6.4.

Tabella 6.3: Parametri della prova, plexi 4 mm

Prova	I [W]	τ_I [s]	t_{obs} [s]	Δt [s]
1	2.500	20	1200	1
2	2.500	5	1200	1

Per un impulso di 20 secondi, si nota come non sia possibile, con i criteri adottati, ricavare la profondità di alcuni fori, in particolare quelli col diametro minore, anche se **viene rilevata la presenza di tutti tranne D2z3**, cioè il più piccolo e più profondo.

Tabella 6.4: Fori, I 20s, t_{obs} 1200s

$D[mm]$	$z[mm]$	$z_{exp}[mm]$	err %	note
6	2	2.4	20	Individuazione buona
6	3	3.3	10	Non visibile sulle termografie
4	1	n.a.	n.a.	Andamento negativo Δf per basse f
4	2	2.8	40	
4	3	3.3	10	Identificazione non precisa
2	1	n.a.	n.a.	Foro con picco di fase negativo
2	2	n.a.	n.a.	Foro con picco di fase negativo
2	3	n.a.	n.a.	Non identificabile

L'impulso da 5 secondi fornisce energia sufficiente solo per rilevare i fori a profondità 1 mm, tuttavia il basso rapporto segnale-rumore non consente in questo caso il calcolo della profondità.

6.1.4 Misure convenzionali con termocoppie

A fianco delle prove con termocamera, sono state eseguite alcune analisi con termocoppie fissate sul provino.

La loro taratura è stata effettuata utilizzando il termostato del bagnetto termostatico come riferimento: sono state immerse all'interno del bagno tutte le sonde di temperatura dell'apparato, accomodandole in modo che non toccassero la superficie interna dell'involucro. Si sono indagati cinque valori di temperatura, da 20° a 60° con intervallo di 10°, per ognuno dei quali, raggiunta una condizione di regime, sono state acquisite 160 letture, una ogni 15 secondi, per sonda. Il valore medio delle misure della singola temperatura costituisce un punto di calibrazione, interpolando i cinque punti si ottiene una retta con coefficiente 1.0000. La deviazione standard delle misure è 0.02° per temperatura costante (vedi [17]).

Tra le misure effettuate, principalmente per confronto con i valori della termocamera, particolarmente interessante è stata l'osservazione del riscaldamento della parte posteriore del provino, causata prevalentemente dall'ambiente chiuso, prima una scatola di cartone, poi un box realizzato appositamente durante questo lavoro, in cui il provino stesso era collocato per eliminare disturbi e riflessioni provenienti dall'esterno. Tale contributo è stato accertato mediante il confronto con un'analisi numerica con e senza riscaldamento imposto sulla faccia posteriore. Il box è stato quindi rimosso.

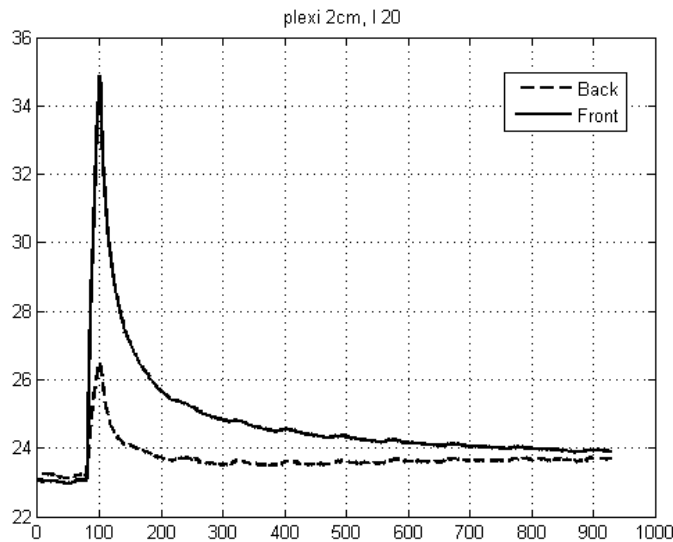


Figura 6.5: Plexi 2 cm, termocoppie fronte e retro

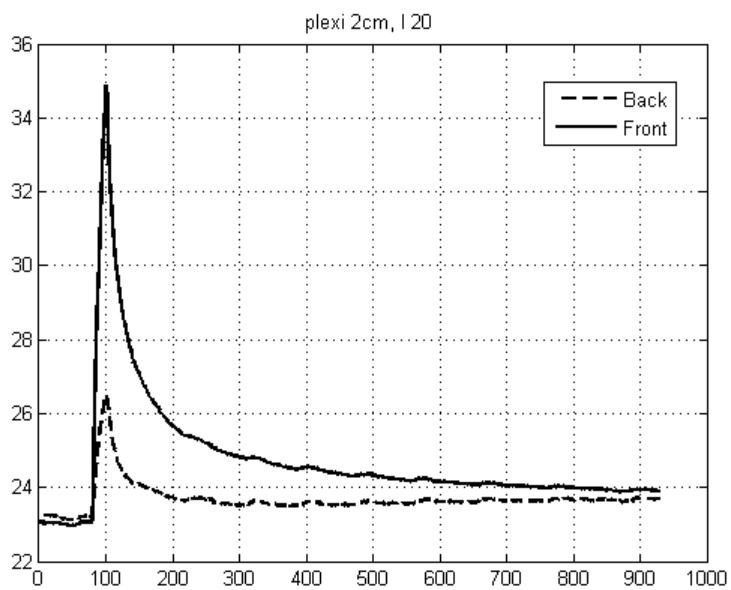


Figura 6.6: Plexi 4 mm, termocoppie fronte e retro, I 20

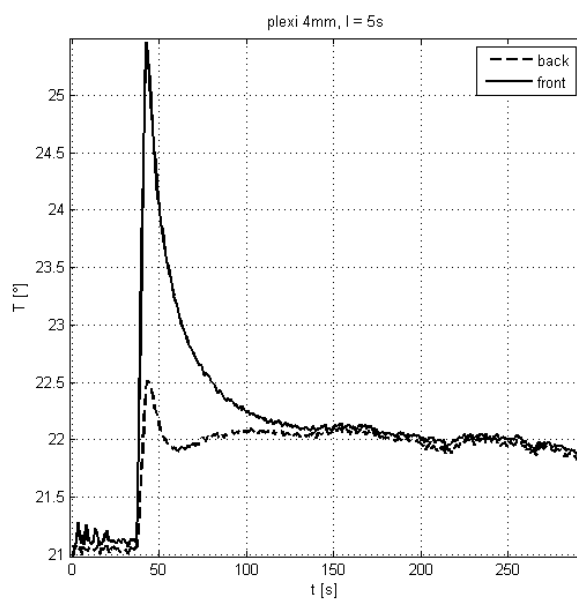


Figura 6.7: Plexi 4 mm, termocoppie fronte e retro, I 5

6.2 Analisi numeriche

6.2.1 Lastra plexiglas 2 cm

Le seguenti prove sono state eseguite mantenendo i parametri di acquisizione ed eccitazione utilizzati per gli esperimenti nei lavori precedenti ([13], [15]):

Tabella 6.5: Parametri di prova, plexi 2cm

I [W]	t_I [s]	f_{acq} [Hz]	t_{obs} [s]
1250	20	1	1200

Nelle figure 6.8 e 6.9 si notano due comportamenti significativi della $\Delta\phi$ al variare dei parametri del difetto:

- All'aumentare della profondità del difetto corrisponde un minor picco di $\Delta\phi$, che si manifesta a frequenze più basse. La frequenza $f_{\Delta\phi_{max}}$ in corrispondenza del picco è quindi un possibile parametro per la stima della profondità (vedi [15]), anche se non è l'unico possibile (in [14] si utilizza la frequenza corrispondente al primo zero, denominata *blind frequency*).
- All'aumentare del diametro del difetto corrisponde un aumento del picco di $\Delta\phi$, mentre la frequenza associata si mantiene invariata. Tale frequenza è associabile al diametro e può essere utilizzata per la sua stima.

In figura 6.10 si notano le *lunghezze termiche di diffusione* corrispondenti alle frequenze risultanti dalla trasformata di Fourier, per $t_{oss} = 1200s$. Se ne ricorda la definizione, data nel paragrafo 3.1.1:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad [m]$$

Per questo tempo di osservazione, e quindi risoluzione in frequenza, non possono essere identificati correttamente difetti situati a profondità maggiori di $C1 \cdot \mu$. Per il calcolo di $C1$ sono state effettuate prove al variare del diametro e della profondità del difetto ed è stata effettuata una regressione lineare (figura 6.11), imponendo che la curva passi per l'origine, in quanto all'assenza di difetto ($z = 0$) deve necessariamente corrispondere $\mu = 0$ (vedi paragrafo 4.8). Ne risulta la relazione, per il calcolo della profondità numerica z_n

$$z_n = 0.9332\mu$$

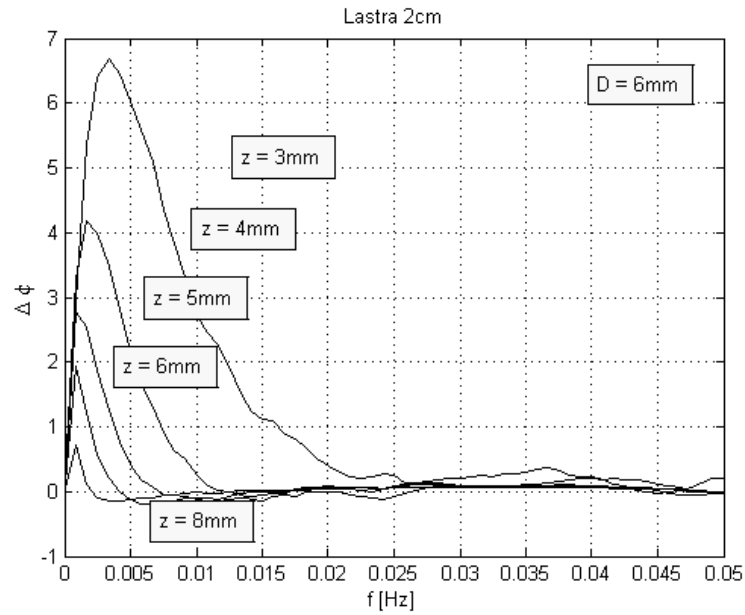


Figura 6.8: Differenza di fase, diametro costante, profondità variabile

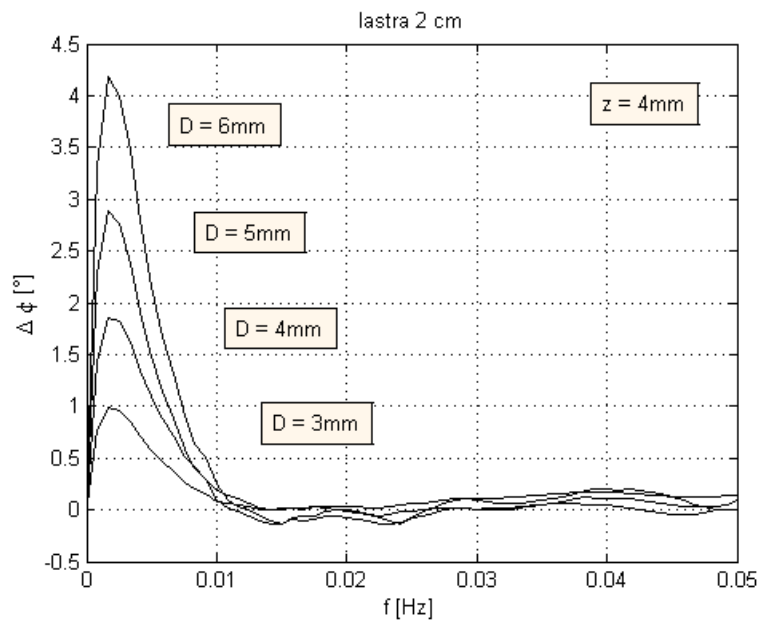


Figura 6.9: Differenza di fase, diametro variabile, profondità costante

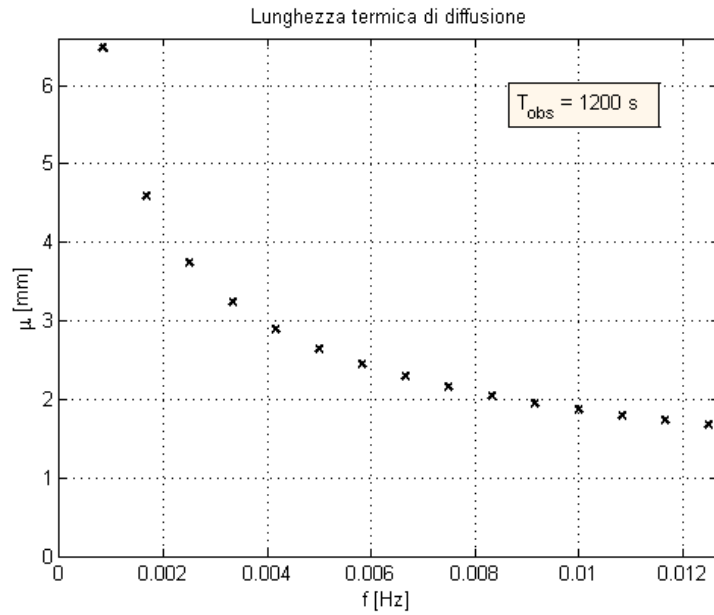


Figura 6.10: Lunghezza termica di diffusione μ a basse frequenze, plexiglas®

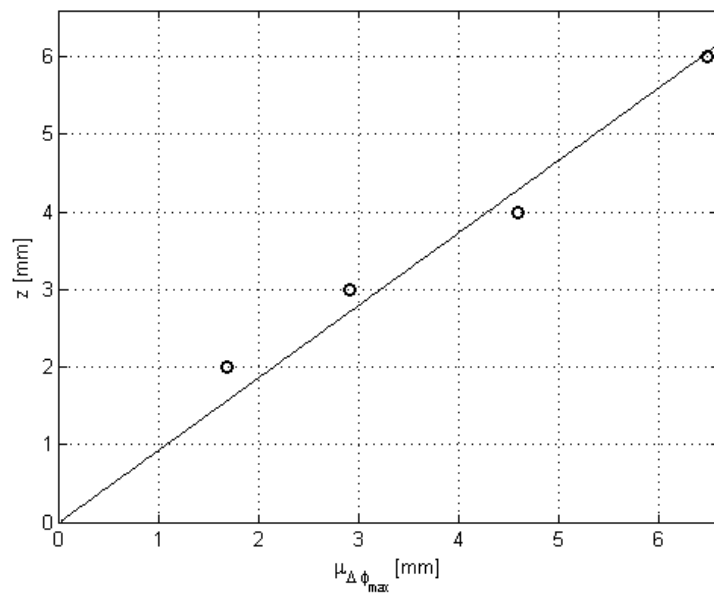


Figura 6.11: Regressione lineare, legame z - μ

tramite cui si ottengono i risultati di tabella 6.6, che risultano essere indipendenti dal diametro del difetto.

$z[mm]$	$z_n[mm]$	err %
6	6.05	0.83
4	4.28	7
3	2.71	9.6
2.5	2.71	8.4
2	1.56	22

Tabella 6.6: Profondità vere e calcolate

6.2.2 Lastra plexiglas 4 mm

In questo paragrafo sono presentati i risultati di analisi sui singoli fori ed il confronto con gli andamenti sperimentali, mirati ad evidenziare caratteristiche e criticità generali tipiche delle analisi su provini *sottili*.

z3D6

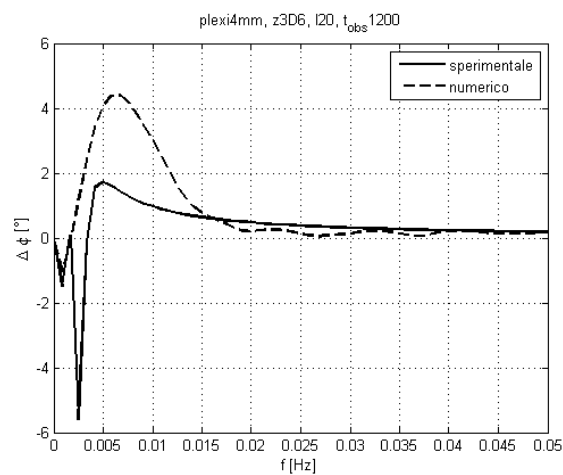


Figura 6.12: Differenza di fase, sperimentale e numerico

Foro non visibile su termografie ma solo con analisi di fase, presenta un accenno di andamento negativo della differenza di fase *foro-sound* a basse frequenze, enfatizzato dall'interpolazione polinomiale applicata ai dati dell'esperimento.

È stata eseguita anche un'analisi della differenza di fase al variare del tempo di riscaldamento: si osserva un leggero *shift* all'indietro del picco al ridurre la durata dell'impulso, fenomeno bilanciato dalla taratura del coefficiente $C1$ per la data durata.

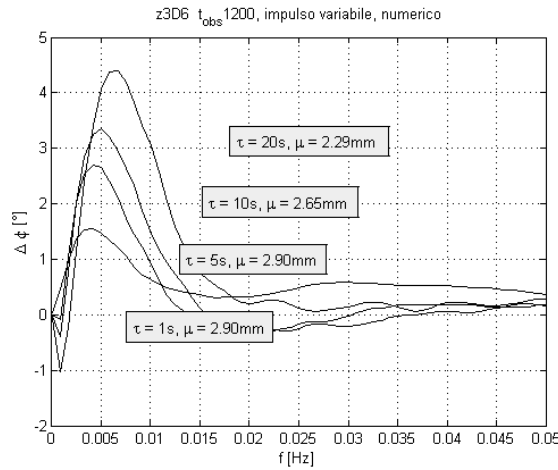


Figura 6.13: Differenza di fase, impulso variabile

z2D6

In questo caso il confronto sperimentale-numerico vede il modello rappresentare con fedeltà l'iniziale picco di fase negativo, mentre vi è differenza nella frequenza del picco positivo.

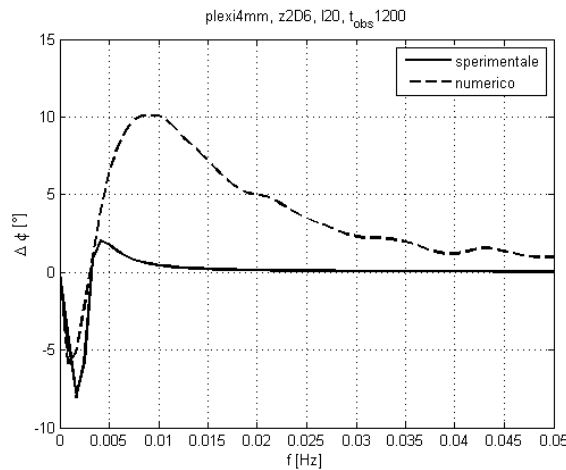


Figura 6.14: Differenza di fase, numerico - sperimentale

z1D4

Questo foro, sperimentalmente, non manifesta il picco di fase positivo ma solo negativo.

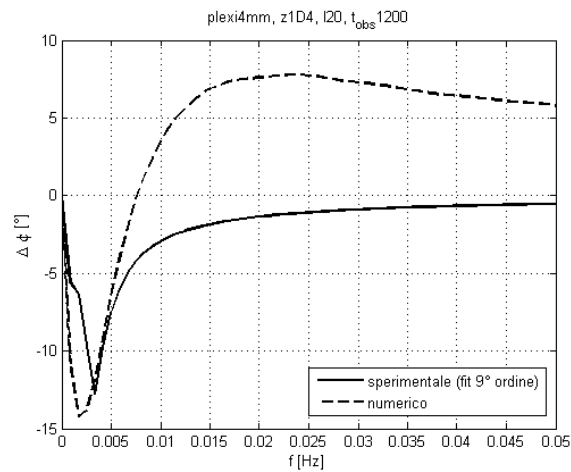


Figura 6.15: Differenza di fase, numerico - sperimentale

Si nota la differenza di temperatura foro-sound, che suggerisce la possibilità di tempi di osservazione inferiori e mostra il buon accordo tra dati sperimentali e modello numerico.

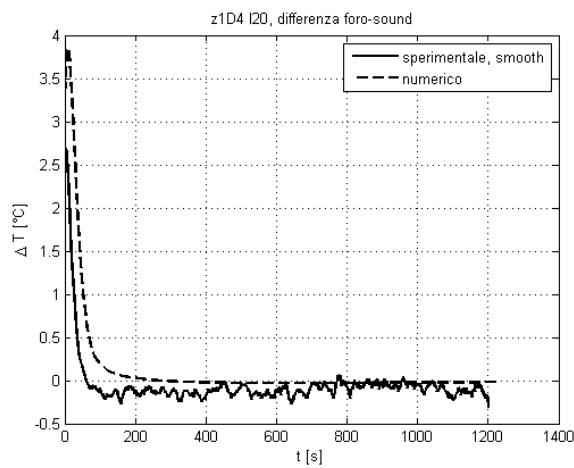


Figura 6.16: Differenza di temperatura, numerico - sperimentale

z1D2

Foro visibile solo nel suo picco negativo, come si vede dal diagramma di fase relativo alla terza frequenza:

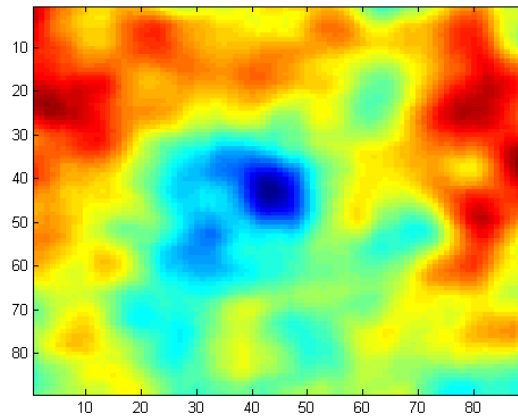


Figura 6.17: diagramma di fase, frequenza 3

Per questo foro, è stata eseguita una simulazione confrontando due impulsi termici di durata uguale ma potenza differente. Si nota come l'andamento della differenza di fase presenta un picco anticipato per potenza maggiore, mentre è da attendersi un miglioramento del rapporto segnale-rumore.

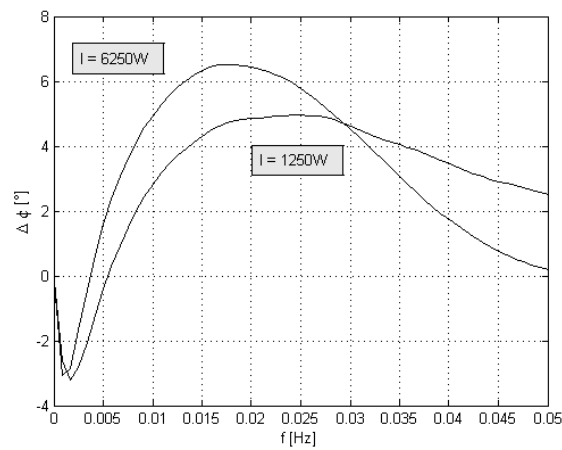


Figura 6.18: diagramma di fase, due potenze

6.2.3 Variazione di materiale del foro

Lo script realizzato può essere utilizzato per un'analisi dei risultati al variare del coefficiente di riflessione tra il materiale del provino e quello del difetto, simulato con un'inclusione avente le proprietà termofisiche del plexiglas moltiplicate per un coefficiente tale da ottenere il valore desiderato di \hat{r} . In figura 6.19 si nota come il loro legame sia considerevole lineare con buona approssimazione.

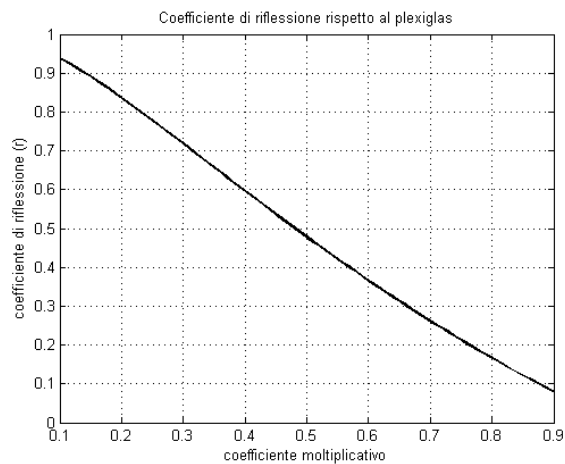


Figura 6.19: Variazione di \hat{r} plexiglas - materiale 2

Il valore del picco di temperatura risulta essere direttamente proporzionale ad \hat{r} , la sua posizione è invariata.

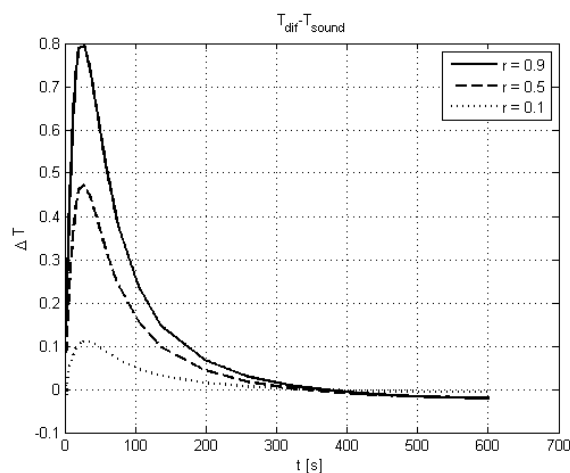


Figura 6.20: ΔT su plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}

Il picco di differenza di fase diminuisce al ridursi di \hat{r} e mostra un anticipo in frequenza, evidenziando la necessità di una calibrazione della prova al variare del materiale del difetto.

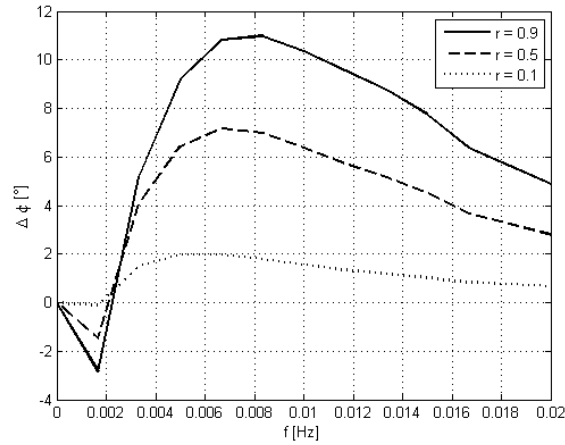


Figura 6.21: ΔT su plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}

Una simulazione effettuata per vari valori di \hat{r} mostra infine il legame atteso tra il valore di \hat{r} ed il picco di differenza di temperatura difetto-*sound*.

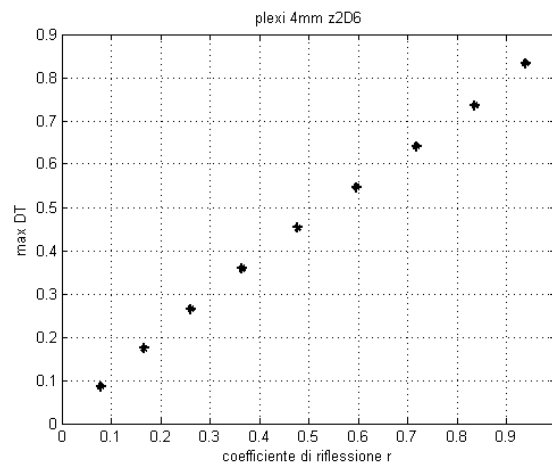


Figura 6.22: ΔT massimo, plexi 4 mm, z2D6, vario \hat{r}

Capitolo 7

Definizione dei parametri ottimali

Sono state eseguite diverse prove al variare dei parametri utilizzando il programma di regressione automatica descritto nel paragrafo 5.3. Dall'analisi dei risultati e dal senso fisico derivante sia dalle prove sperimentali che dalle analisi teoriche, si è giunti alla definizione una serie di criteri per definire i parametri di eccitazione ed acquisizione per una prova PPT.

7.1 Impulso

7.1.1 Durata

Date le proprietà termiche del provino, si effettua la regressione sui fori variandone profondità, su tutto lo spessore, e diametro. Si valuta la massima frequenza cui corrisponde il picco di differenza di fase, a partire da un impulso tentativo di corta durata: la *durata dell'impulso* deve essere tale per cui tale frequenza sia posta entro il 50% del lobo principale della curva dell'ampiezza della trasformata dell'impulso. Dal momento che il primo zero di tale curva è posto a $f_0 = 1/\tau_I$, si ha

$$\tau_I = \frac{1}{2 \max(f_{\Delta\phi_{\max}})} \quad (7.1)$$

Ad esempio, si effettua la simulazione per la lastra con caratteristiche di tabella 7.1. Dalla simulazione risulta $\max(f_{\Delta\phi_{\max}}) = 0.035Hz$, relativa al foro **D5z1**. Si ottiene

$$\tau_I = \frac{1}{2 \cdot 0.035} = 14.3s$$

Tabella 7.1: Durata impulso, esempio

I [W]	τ_I [s]	Mat.	t [mm]	t_{oss} [s]	CONV	Soglia
1250	5	plexi/aria	4	600	SI	0.2

È ovviamente consigliabile cercare la massima durata dell'impulso che ecciti le frequenze di interesse, in quanto a parità di potenza delle lampade si ottiene una maggiore energia depositata sul provino.

7.1.2 Potenza

La *potenza di eccitazione* è direttamente proporzionale al contrasto di temperatura tra zona *sound* e difetto, come dimostrato in [30], pertanto il valore massimo è dettato unicamente dalla potenza disponibile e dalla temperatura sopportabile dall'oggetto analizzato (si parla di controlli non distruttivi!). Il valore minimo è dettato dalla soglia di sensibilità della termocamera e dalla profondità e diametro del difetto: il programma di regressione fornisce un'indicazione sui quali difetti sono visibili: data la potenza delle lampade o, in generale, del sistema di riscaldamento, si può stabilire un limite preliminare per i difetti osservabili.

Tabella 7.2: Analisi impulso per plexi4mm

I [s]	τ_I [s]	Mat.	t	t_{oss}	C1	σ	CONV	Soglia
1250	13	plexi/aria	4mm	600	1.284	0.53777	SI	0.2
z	D	μ_n	z_{num}	err %	$\Delta\phi_{\text{max}}$	$f_{\Delta\phi_{\text{max}}}$	t₁	t_{end}
1	2	0.81	0.99	0.71	3.86	0.05	1	40
1	4	1.00	1.23	-22.56	10.71	0.04	1	67
1	6	1.18	1.45	-45.02	15.78	0.03	1	97
2	2	1.53	1.87	6.39	1.64	0.02	0	0
2	4	1.73	2.12	-6.14	5.85	0.01	4	83
2	6	1.87	2.29	-14.65	10.86	0.01	4	146
3	2	2.29	2.81	6.39	0.42	0.01	0	0
3	4	2.29	2.81	6.39	1.90	0.01	0	0
3	6	2.29	2.81	6.39	3.84	0.01	26	85

Non sorprende osservare in tabella 7.2 che i fori non rilevabili, evidenziati in grigio, sono quelli più profondi e dal diametro minore.

7.2 Acquisizione

7.2.1 Frequenza di campionamento

Valgono le considerazioni effettuate nel paragrafo 4.3.1 circa l'aliasing, e si rimanda a [14] per approfondimenti. Per materiali poco conduttivi, il range di frequenze utile per localizzare i difetti è sufficientemente basso da poter utilizzare una f_c pari ad 1Hz, cioè un'acquisizione al secondo, con ampio margine di sicurezza: la *frequenza di Nyquist*, pari a 0.5Hz è di un'ordine di grandezza superiore a quelle di interesse.

7.2.2 Tempo di osservazione

Il tempo di osservazione deve assicurare una buona risoluzione alle basse frequenze per i materiali più spessi e deve essere sufficiente per l'osservazione completa del transitorio in cui si manifesta una differenza di temperatura in corrispondenza del difetto.

Per soddisfare la prima condizione, è necessario aggiustare t_{oss} sulla base del grafico $f - \mu$ a basse frequenze (vedi fig. 6.10). Il programma di regressione fornisce invece l'indicazione sul tempo in cui non è più rilevabile un ΔT . Un criterio di massima può essere stabilito come:

$$t_{oss} = 1.25 \cdot t_{end}$$

Operando con maggiori frequenze di acquisizione, è necessario valutare la quantità di memoria necessaria per la memorizzazione dei termogrammi e la loro elaborazione.

Si ricorda infine che l'algoritmo FFTW è più efficiente se il numero di termografie è potenza di due o ha bassi fattori primi.

Capitolo 8

Conclusioni e sviluppi futuri

Questo lavoro di tesi si pone in continuità con quelli precedenti sull'argomento, che avevano indicato la PPT con singolo impulso come tecnica più promettente ed affidabile rispetto alla LT (Gasparri, [11]), effettuato un'analisi del rumore e delle problematiche inerenti all'analisi di fase (Piu, [12]), stabilito il criterio di identificazione del difetto ed implementato le tecniche di elaborazione dell'immagine per il riconoscimento dei difetti (Gutiérrez Fajardo, [13]) ed affinato la tecnica di riconoscimento ed identificazione (Casetta, [15]). In tutti i lavori citati sono stati analizzati provini in plexiglas di 2 cm di spessore.

L'obiettivo iniziale era la messa a punto della tecnica per la verifica dell'integrità dei materiali compositi con spessori dell'ordine dei millimetri, tipici dell'industria aerospaziale. A tal fine, è stato effettuato uno studio sperimentale su provini in plexiglas di 4 mm di spessore, che manifestano un comportamento diverso da quelli spessi 2 cm, considerabili come un mezzo semi-infinito. Ottenuti risultati promettenti ma con alcune lacune nell'identificazione dei fori, si è sviluppato un modello ad elementi finiti, validato con i dati sperimentali, per la valutazione dei limiti della tecnica, la previsione del comportamento di altri materiali con altre tipologie di difetto e, soprattutto, la definizione dei parametri dell'esperimento e l'identificazione di possibili modifiche dell'apparato per il miglioramento della tecnica.

L'apparato sperimentale è stato modificato con la realizzazione di un box apribile sui lati e la sostituzione delle due lampade alogene da 500 W l'una montate in un faretto con sei lampade alogene, sempre di 500 W, montate su una struttura appositamente costruita in laboratorio.

Gli sviluppi futuri consistono nell'analisi del comportamento di provini inclinati finalizzati all'acquisizione della tecnica per le analisi di manufatti di varia forma, argomento attualmente sviluppato da un lavoro di tesi in corso d'opera, l'applicazione dei risultati del presente lavoro nell'analisi di provini

in materiale composito con difetti di varia natura, ed un eventuale confronto con altre tecniche di analisi non distruttiva.

Infine, con qualche modifica per la velocizzazione della fase di post-processing, si ritiene che la tecnica possa essere sperimentata nel mondo industriale in collaborazione con aziende del ramo aerospaziale.

Appendice A

Trasformata del rettangolo, dimostrazione

La formula per il calcolo della trasformata di Fourier

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (\text{A.1})$$

viene applicata per il segnale rettangolare centrato nell'origine di durata T ed ampiezza A :

$$F_r(\omega) = A \int_{-T/2}^{T/2} e^{-j\omega t} dt \quad (\text{A.2})$$

Per il calcolo dell'integrale si riscrive il fasore in forma trigonometrica

$$F_r(\omega) = A \int_{-T/2}^{T/2} [\cos(2\pi ft) - j \sin(2\pi ft)] dt \quad (\text{A.3})$$

L'integrale del seno è nullo, essendo una funzione dispari. Per il coseno si procede al cambio di variabile $2\pi ft = u$ tale per cui

$$dt = \frac{du}{2\pi f} \quad (\text{A.4})$$

Risulta quindi

$$\begin{aligned}
 F_r(\omega) &= \frac{A}{2\pi f} \int_{-T/2}^{T/2} \cos(u) du = \frac{A}{2\pi f} [\sin(u)]_{-T/2}^{T/2} \\
 &= \frac{A}{2\pi f} \left[\sin\left(2\pi f \frac{T}{2}\right) - \sin\left(-2\pi f \frac{T}{2}\right) \right] \\
 &= A \frac{\sin(\pi f T)}{2\pi f} \tag{A.5}
 \end{aligned}$$

Moltiplicando numeratore e denominatore per T si ottiene la formula finale:

$$F_r(\omega) = AT \frac{\sin(\pi T f)}{2\pi T f} \tag{A.6}$$

In questo ambito, è più comodo trattare l'impulso che inizia nell'origine, quindi traslato rispetto al precedente di $T/2$. La sua trasformata è ricavata direttamente dalla precedente sfruttando la proprietà di traslazione della trasformata di Fourier:

$$F_t(\omega) = AT \frac{\sin(\pi T f)}{2\pi T f} e^{-j\pi T f} \tag{A.7}$$

Appendice B

Procedura di analisi delle termografie

- Definizione dei dati:

α	$[m^2/s]$	Diffusività termica
$C1$	$[.]$	Legame $\mu - z$
dt	$[s]$	Passo temporale
t_{oss}	$[min]$	Finestra di acquisizione

- **aprisalvafile(n)**
Apertura file *tiff*, eventuale salvataggio della sequenza di immagini in formato *mat* con $n=1$.
- **taratura_A(A)**
Conversione dei valori della termocamera in valori di temperatura.
- **phase_abs_analysis(A,wt*60,dt)**
Analisi di fase e di ampiezza, divisa tra parte superiore e parte inferiore dei termogrammi.
- **filtri(A,phi,minfreq,maxfreq)**
Filtraggio delle immagini con filtri mediano e gaussiano (i parametri si impostano all'interno della funzione).
- **morph2(J)**
Ricostruzione morfologica dell'immagine, analisi blob. Funzione chiamata all'interno della precedente.

- **Calcoli finali**

Calcolo correlazione, calcolo profondità del difetto alla frequenza di massima correlazione.

Appendice C

Provini in plexiglas

Le proprietà termofisiche dei provini sono le seguenti:

Tabella C.1: Proprietà Plexiglas

k [$\frac{W}{mK}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	C [$\frac{J}{kgK}$]	α [$\frac{m^2}{s}$]
0.19	1190	1420	1.12e-007

L'emissività della vernice superficiale è stata valutata sperimentalmente in [17], ed è pari a 0.98.

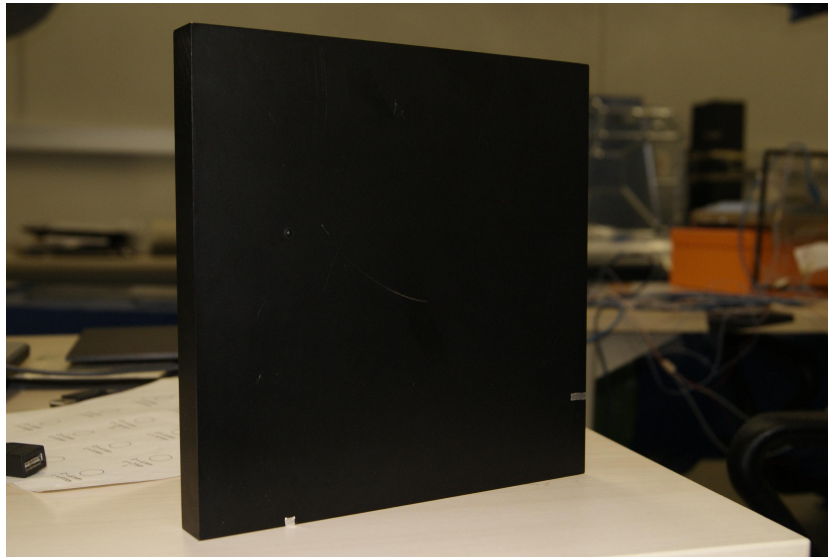


Figura C.1: Provino plexiglas 2 cm, fronte

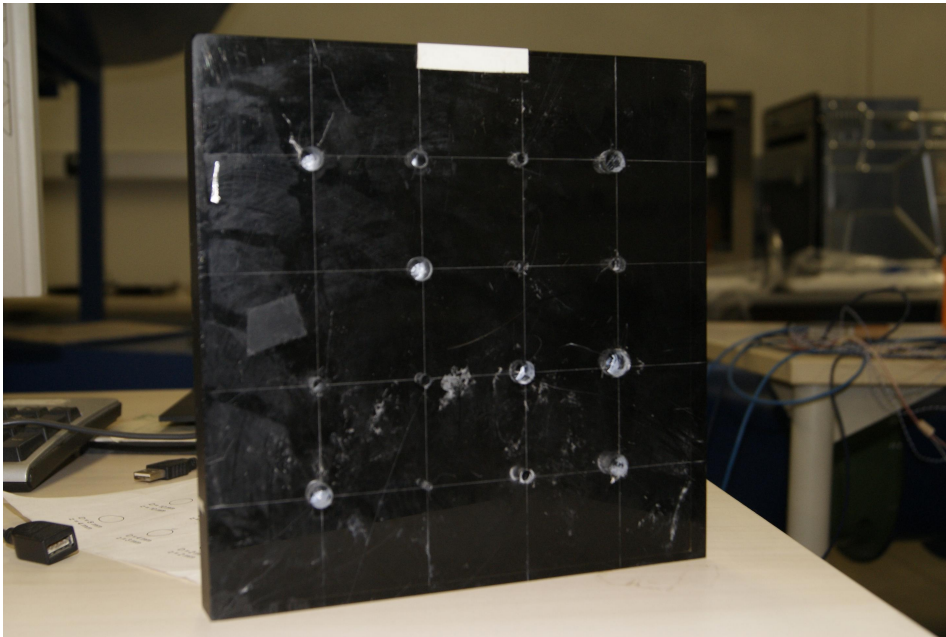


Figura C.2: Provino plexiglas 2 cm, retro

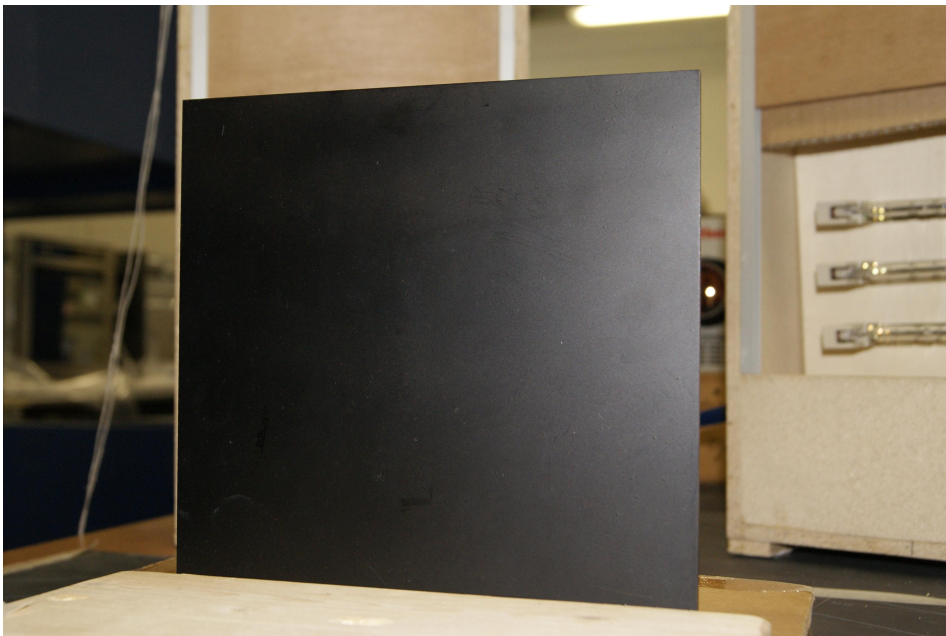


Figura C.3: Provino plexiglas 4 mm, fronte

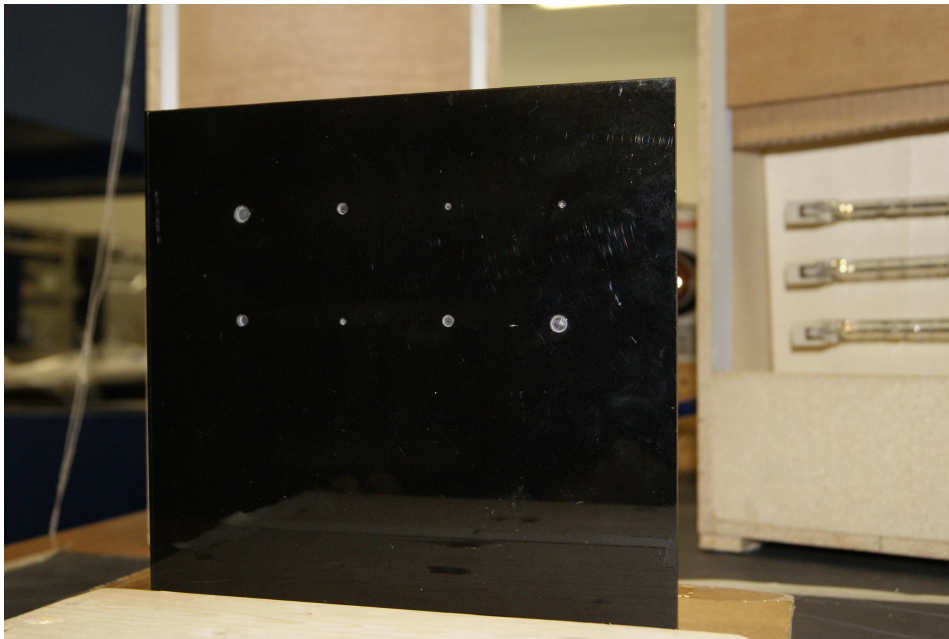


Figura C.4: Provino plexiglas 4 mm, retro

Appendice D

Modifiche dell'apparato sperimentale

Il laboratorio ThermALab si è dotato di nuove lampade per aumentare la potenza dell'apparato sperimentale. Si riporta il disegno per lo studio di due possibili configurazioni di montaggio.

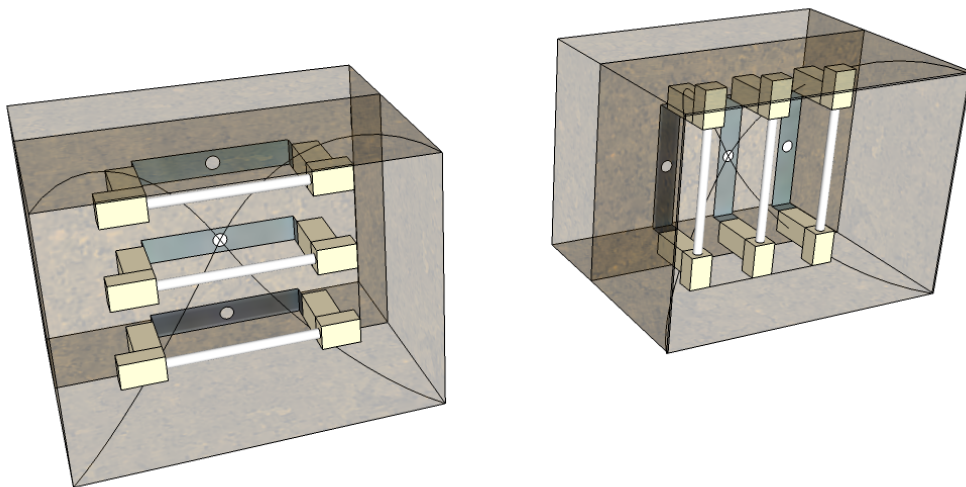


Figura D.1: Lampade per apparato sperimentale

Si è optato per la configurazione orizzontale. In foto mancano le superfici riflettenti di alluminio previste.

Si riporta anche il disegno e la realizzazione del box di prova, successivamente scartato.



Figura D.2: Lampade montate

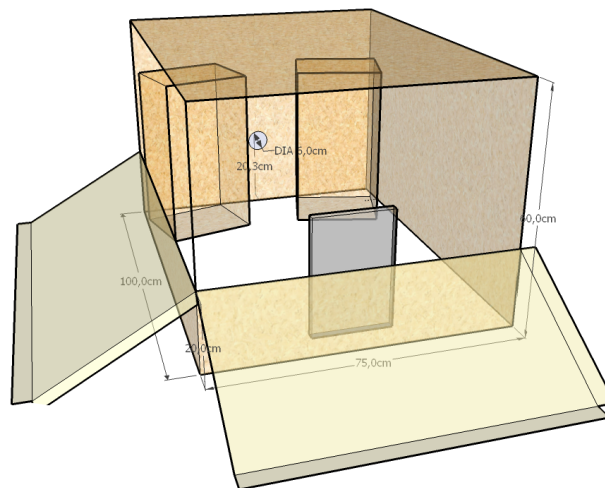


Figura D.3: Box prova, disegno

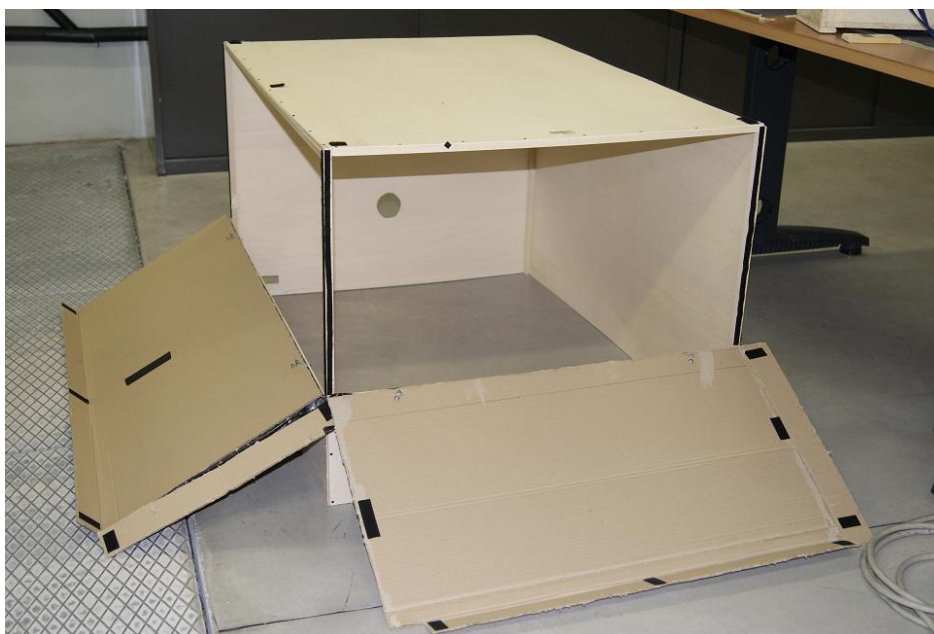


Figura D.4: Box prova costruito

Acronimi

C/C	Carbon fibre-reinforced carbon
DFMTWI	Digitized Frequency Modulated Thermal Wave Imaging
FFT	Fast Fourier Transform
FMTWI	Frequency Modulated Thermal Wave Imaging
FPA	Focal Plane Array
FWHM	Full Width Half Maximum
IRNDT	InfraRed Non Destructive Testing
LT	Lock-in Thermography
MWIR	Medium Wavelength Infrared
NDT	Non Destructive Testing
PPT	Pulsed Phase Thermography
PT	Pulsed Thermography
SVD	Singular Value Decomposition
TSR	Thermal Signal Reconstruction

Bibliografia

- [1] X. Maldague, *Introduction to NDT by Active Infrared Thermography*, Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval (Canada)

Non Destructive Testing

- [2] NDT Resource center, <http://www.ndt-ed.org/>
- [3] K. Hall, *Non destructive testing*, Department of Civil and Environmental Engineering, Illinois
- [4] M. Wall, F. A. Wedgwood, S. Burch, *Modelling of NDT Reliability (POD) and applying corrections for human factors*, ECNDT '98 - PROCEEDINGS online (1998)
- [5] X. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons, Inc., (2001)
- [6] C.J. Hellier, *Handbook of non destructive evaluation*, McGraw - Hill, (2003)
- [7] P. Cawley, *Inspection of Composites - Current Status and Challenges*, ECNDT, (2006)
- [8] V. Capitani, M. Capriolo, D. Seni, *Caratterizzazione delle difettologie nei materiali compositi in Fibra di Carbonio rilevate tramite il controllo ultrasonoro*, BYTEEST s.r.l. Torino, disponibile su www.ndt.net, (2009)
- [9] Indiana Department of transportation, *Bridge inspection manual*, disponibile su http://www.in.gov/dot/div/contracts/standards/bridge/inspector_manual, (2010)
- [10] Normativa UNI EN ISO 9712, *Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel*, (2012)

Tesi di laurea / dottorato

- [11] F. Gasparri, *Studio di tecniche termografiche attive con analisi di fase per controlli non distruttivi*, Politecnico di Milano (2004)
- [12] F. Piu, *Studio sperimentale di nuove metodologie di analisi con la termografia modulata per il riconoscimento di difetti*, Politecnico di Milano (2005)
- [13] A. Gutiérrez Fajardo, *An analytical and experimental study on defect recognition methodologies with Pulse Phase Thermography*, Politecnico di Milano (2005)
- [14] Clemente Ibarra Castanedo, *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*, Ph.D. Thesis, Université Laval, Quebec City (2005)
- [15] G. Casetta, *Studio numerico-sperimentale per la rilevazione di difetti mediante termografia pulsata con analisi di fase*, Politecnico di Milano (2007)
- [16] C. A. Larsen, *Document Flash Thermography*, Utah State University (2011)
- [17] Damiano Fustinoni, *Analisi della convenzione forzata su superfici variamente strutturate*, Ph.D Thesis, Politecnico di Milano (2012)

NDT con termografie

- [18] D. Batesa, G. Smitha, D. Lua, J. Hewittb, *Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components*, Composites: Part B 31 175-185, (2000)
- [19] A.J. Slifka, T. Hall, E.S. Boltz, *Thermal Evaluation of Scorched Graphite-Epoxy Panels by Infrared Scanning*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol.108 No.2 (2003)
- [20] K.E. Cramera, W.P. Winfreea, K. Hodgesb, A. Koshtib, D. Ryanc and W.W. Reinhardtd, *Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA*, NASA report disponibile su <http://ntrs.nasa.gov>, (2006)
- [21] S.M. Shepard, J.R. Lotha, T.Ahmed, *Flash thermography contrast model based on IR camera noise characteristics*, Nondestructive testing and evaluation, vol.22, 2-3, (2007)

- [22] V.P. Vavilov *Pulsed thermal NDT of materials: back to the basics*, Nondestructive testing and evaluation, vol.22, 2-3, (2007)
- [23] A.A. Badghaish, D.C. Fleming, *Non-destructive inspection of composites using step heating thermography*, Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol.42 No.13 (2008)
- [24] V.S. Ghali, R. Mulaveesala, *Comparative Data Processing Approaches for Thermal Wave Imaging Techniques for Non-Destructive Testing*, Sens Imaging 12: 15-33, (2011)

Modelli teorici ed analitici

- [25] S.D. Cowell, D.D. Burleigh, *Flash heat flux requirements for thermographic inspection of fiber composite laminates*, SPIE vol. 1094 Thermosense XI, (1989)
- [26] S.K. Lau, D.P. Almond, J.M. Milne, *A quantitative analysis of pulsed video thermography*, NDT & E International, Vol.24 No.4 (1991)
- [27] D.P. Almond, S.K. Lau, *Defect sizing by transient thermography, an analytical treatment*, Journal of Applied Physics 27 1063, (1994)
- [28] M. Bertolotti, G.L. Liakhov, R.Li Voti, S. Paoloni, C. Sibilla, *Thermal waves reflection and refraction: Theoretical and experimental evidence* Journal of Applied Physics, 85(7) (1999)
- [29] I. Perez, P Kulowitch, S. Shepard, *Modeling of pulsed thermography in anisotropic media*, Naval Air Warfare Center Aircraft Division, Patuxent River, Maryland (1999)
- [30] D. P. Almond, S. G. Pickering, *An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit*, Journal of Applied Physics 111, 093510 (2012)

Modelli numerici

- [31] Y.A. Plotnikov, W.P. Winfree, *Thermographic imaging of defects in anisotropic composites*, NASA Langley research center, disponibile dal 2010 su <http://ntrs.nasa.gov>, (2000)
- [32] William B. J. Zimmerman, *Process Modeling and Simulation with Finite Elements Methods*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2004)

-
- [33] J.K. Farooqui, M.A. Sheikh, *Finite element modeling of thermal transport in composite unit cell using ABAQUS/CAE*, ABAQUS Users' Conference (2005)
- [34] M. Krishnapillai, R. Jones, I.H. Marshall, M. Bannister, N. Rajic, *NDTE using pulse thermography: Numerical modeling of composite subsurface defects* Composite Structures 75, 241-249, (2006)

PT e PPT, materiali aerospaziali

- [35] X. Maldague, S. Marinetti, *Pulse phase infrared thermography*, Journal of Applied Physics, 79 (5), (1996)
- [36] S. Marinetti, Y. A. Plotnikov, W. P. Winfree, A. Braggiotti, *Pulse phase thermography for defect detection and visualization*, NASA Langley Research Center MS 231 *in collaborazione con* Consiglio Nazionale delle Ricerche - LADSEB, (1999)
- [37] W. Ben Larbi, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein , A. Bendada, and X. Maldague, *Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials*, Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (1999)
- [38] D.P. Almond, R.J. Ball, A. Dillenz, G. Busse, J.-C. Krapez, F. Galmiche and X. Maldague, *Round Robin comparison II of the capabilities of various thermographic techniques in the detection of defects in carbon fibre composites* proc. of QIRT, (2000)
- [39] F. Galmiche, X. Maldague, *Depth defect retrieval using the wavelet pulsed phased thermography*, Proc. of QIRT, (2000)
- [40] S.G. Zacharia, J. Lahiri, *Data analysis techniques in thermographic NDT of composite: a critical comparison* National Seminar of ISNT Chennai, (2002)
- [41] X. Maldague, F. Galmiche, A. Ziadi, *Advances in pulsed phase thermography*, Infrared Physics & Technology 43 (2002), 175-181
- [42] N.P. Avdelidis, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, Z.P. Marioli-Riga, D.P. Almond, *A thermographic comparison study for the assessment of composite patches*, Infrared Physics and Technology, 45, (2004)

-
- [43] C. Ibarra-Castanedo, D. González and X. Maldague, *Automatic algorithm for quantitative pulsed phase thermography calculations*, Disponibile su www.ndt.net, (2004)
- [44] C. Meola, G.M. Carlomagno, L. Giorleo, *Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography*, Journal of Nondestructive Evaluation, vol.23 n.4, (2004)
- [45] D.A. González, C. Ibarra-Castanedo, J.M. López-Higuera, X. Maldague, *New Algorithm based on the Hough Transform for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences*, Proc. Vth International Workshop, Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials (2005)
- [46] D.A. Gonzalez, C. Ibarra-Castanedo, F.J. Madruga, X. Maldague, *Differentiated absolute phase contrast algorithm for the analysis of pulsed thermographic sequences*, Infrared Physics & Technology 48, 16-21, (2006)
- [47] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X. Maldague, A. Bendada, *Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data*, Proc. of SPIE Vol. 6205, 620514, (2006)
- [48] R. Mulaveesala, S. Tuli, *Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive sub-surface defect detection*, Applied Physics Letters, 89, 191913. (2006)
- [49] M.A. Omar, Y. Zhou, *A quantitative review of three flash thermography processing routines*, Infrared Physics & Technology 51, 300-306, (2007)
- [50] S. M. Shepard, *Flash Thermography of Aerospace Composites*, IV Conferencia Panamericana de END, disponibile su www.ndt.net, (2007)
- [51] M. Genest, A. Bendada, S. Guibert, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, J-M. Piau, M. Susa, B. Tang, M. Brothers, A. Fahr, *Comparison of Thermographic Inspection Techniques for Nondestructive Evaluation of CF-18*, Technical Report at Laval University, (2007)
- [52] C. Ibarra-Castanedo, E. Grinzato, S. Marinetti, P. Bison, M. Genest, M. Grenier, J.M. Piau, A. Bendada and X. Maldague, *Recent progresses in the inspection of aerospace components by infrared thermography*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China
- [53] M. Susa, X. Maldague, S. Svaic, I. Boras and A. Bendada, *The influence of surface coatings on the differences between numerical and experimental results for samples subject to a pulse thermography examination*, 9th

International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 2-5, 2008, Krakow - Poland

- [54] G. Zauner, G. Mayr, G. Hendorfer, *Comparative defect evaluation of aircraft components by active thermography*, Proc. of SPIE - IS&T Electronic Imaging, vol.7251, (2009)
- [55] E. Tosti, *Controllo RX e Tecniche NDT Complementari: Una Panoramica delle Attività svolte da AVIO nell'ambito di NDT applicati a Motori Spaziali di Grandi Dimensioni* AVIO Propulsione Aerospaziale, disponibile su www.ndt.net, (2009)
- [56] S. Sfarra, A. Bendada, A. Paoletti, D. Paoletti, D. Ambrosini, C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, *Square Pulse Thermography (SPT) and Digital Speckle Photography (DSP): Non-Destructive Testing (NDT) Techniques Applied to the Defects Detection in Aerospace Materials*, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, (2010)
- [57] R. Montanini, *Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography*, Infrared Physics & Technology 53, 363-371, (2010)
- [58] Vladimir Vavilov, *Infrared thermographic nondestructive testing of composite materials: determining thermal properties, detecting and characterizing hidden defects*, Disponibile su www.ndt.net, (2010)
- [59] F. Lòpez Rodríguez, V. de Paulo Nicolau, H. Oshiro, D. Tancredi, *Non-destructive evaluation of composites materials by pulsed-phase thermography: depth inversion*, Proc. of COBEM, (2011)
- [60] A. Schonberger, S. Virtanen, V. Giese, C. Spieberger, H. Schrottner, J. Rattenberger, J. Wagner, *Non-destructive evaluation of stone-impact damages using Pulsed Phase Thermography*, Corrosion Science 56, 168-17, (2012)

PT e PPT, altri materiali

- [61] Ralf W. Arndt, *Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering*, Infrared Physics & Technology, 53 246-253, (2010)

- [62] J. Doumoulin, C. Ibarra-Castanedo, M. Quiertant, F. Taillade, A. Bendada, X. Maldague, *Evaluation of FRP gluing on concrete structures by active infrared thermography*, Proc. of QIRT, (2010)
- [63] J.V. Leeuwen, M. Nahant, S. Paez, *Study of Pulsed Phase Thermography for the Detection of Honeycombing Defects in Concrete Structures*, www.ndt.net, (2011)
- [64] Xiangning Lu, Guanglan Liao, Zheyu Zha, Qi Xia, Tielin Shi, *A novel approach for flip chip solder joint inspection based on pulsed phase thermography*, NDT&E International 44 , 484-489, (2011)

Trattamento delle termografie

- [65] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, A. Salerno, *New Absolute Contrast for pulsed thermography*, QIRT 2002, disponibile su <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2002/papers/004.pdf>
- [66] C. Ibarra-Castanedo, D. González, M. Klein, M.Pilla, S. Vallerand, X. Maldague, *Infrared image processing and data analysis*, Infrared Physics & Technology, (2004)
- [67] D. A. González, C. Ibarra-Castanedo, M. Pilla, M. Klein, J.M. López-Higuera, X. Maldague, *Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences*, QIRT 2004, disponibile su <http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2004/papers/014.pdf>
- [68] C. Ibarra-Castanedo, H. Benítez, X. Maldague, A. Bendada, *Review of thermal-contrast-based signal processing techniques for the nondestructive testing and evaluation of materials by infrared thermography*, International Workshop on Imaging NDE, (2007)
- [69] B. Sun, Q. Ma, H. Zhao, *Fitting-correlation Analysis of Pulsed Thermographic Sequence Data*, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference of Mechatronics and Automation, Harbin, China
- [70] M.T. Klein, C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague, *Thermographic signal processing through correlation operators in pulsed thermography*, Proc. of SPIE Vol. 6939, 693915, (2008)
- [71] J.C. Ramirez-Granados, G. Paez, M. Strojnik, *Dimensionless heat transfer model to compress and analyze pulsed thermography data for NDT of*

materials Proceedings of the SPIE, Volume 6939, pp. 69391I-69391I, 9 (2008)

- [72] M. Genest, *Image Processing for Automated Flaw Detection in Pulsed Thermography*, disponibile su www.ndt.net, (2009)
- [73] H.D. Benítez Restrepo, *Image quality indexes for infrared nondestructive testing* Slideshow, Infrared Nondestructive Testing Seminar, March 16, (2012)

Brevetti IRNDT

- [74] W. Roth, *Non destructive testing of objects*, U.S. Patent Office, 3,222,917 (1965)
- [75] *Transient thermal method and means for nondestructively testing a sample*, U.S. Patent Office, 3,672,204 (1972)
- [76] U.K. Atomic Energy Authority, Inventor W. N. Reynolds, *A non-destructive technique for detecting defects within a body whose surface is capable of converting radiant energy to thermal energy (...)*, European Patent 0-089-760-A2, (1983)
- [77] U.K. Atomic Energy Authority, Inventor J. M. Milne, *A method and an apparatus are provided for inspecting a coating on a substrate both to enable any disbonds to be located and to measure the thickness of the coating (...)*, European Patent 2-220-065-A, (1989)

Trasmissione del calore

- [78] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd edition, Clarendon Press, Oxford, (1986)
- [79] Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., (2007)
- [80] T. N. Narasimhan, *Fourier's heat conduction equation: History, Influence, and Connections*, Reviews of Geophysics, 37, 1, (1999)

Teoria dei segnali

- [81] E.O. Brigham, *The Fast Fourier Transform and its Applications*, Englewood Cliffs, Prentice Hall (1988)

- [82] M. Frigo, S.B. Johnson, *FFTW: An adaptive software architecture for the FFT*, Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1381-1384 vol.3, (1998)
- [83] A. Falaschi, *Trasmissione dei segnali e sistemi di telecomunicazione*, Licenza Creative Commons, v.0.97 (2005)
- [84] M. Luise, G. M. Vitetta, *Teoria dei segnali*, McGraw - Hill, 3^a edizione (2009)

Altri

- [85] A. P. Morando, S. Leva, *Note di teoria dei campi vettoriali*, Società editrice Esculapio (1998)