POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione dei materiali mediante termografia attiva.



Relatore Prof.ssa Francesca Maria Curà Candidato Luca Corsaro

Correlatori Prof.ssa Raffaella Sesana Prof.ssa Manuela De Maddis

Anno Accademico 2019-2020

Prefazione

La termografia *attiva* è una tecnica di analisi termografica molto utilizzata nel settore meccanico e aerospaziale. I suoi studi, al giorno d'oggi, sono in continua evoluzione interessando diversi campi di applicazione. Questo descrive in pieno una delle sue caratteristiche principali: la versatilità. Il maggiore impiego avviene nell'ambito delle prove non distruttive realizzate principalmente in campo meccanico, ma viene utilizzata ampiamente anche in campo elettronico per l'analisi di circuiti. La strumentazione per eseguire l'analisi termografica è molto semplice. Il fulcro è rappresentato dalla telecamera ad infrarossi, che è lo strumento necessario per acquisire le informazioni sulle quali effettuare le indagini. Un esempio di termocamera si trova in [22], evidenziando alcune delle possibilità di impiego.



Figura 1: telecamera ad infrarossi utilizzata per le analisi termografiche

I risultati presentati in questa tesi sono ricavati applicando le tecniche termografiche Lock-in e Pulsed. Grazie al riscaldamento della superficie del campione in esame, tramite delle apposite sorgenti termiche, si metteranno in risalto aspetti difficilmente individuabili attraverso la tecnica di termografia convenzionale. Il primo approccio di questa tesi consiste nello studio dello stato dell'arte presente in letteratura. Un'analisi approfondita ha sottolineato l'evoluzione tecnologica avvenuta durante gli anni, gli ambiti di applicazione e i materiali di maggiore interesse nelle analisi. I risultati che si ottengono presentano aspetti per lo più qualitativi. Infatti si nota come queste tecniche termografiche siano ancora in fase di sviluppo. Questo passaggio, però, ha permesso di identificare tutte le informazioni principali contenute nella letteratura e utilizzarle come punto di partenza per le successive analisi. Il focus di questa tesi consiste nella caratterizzazione dei materiali mediante l'applicazione di tecniche di termografia attiva. L'attenzione, quindi, si sposta su delle analisi che sono più quantitative che qualitative. Infatti l'obiettivo equivale a studiare il comportamento del materiale in funzione delle sue caratteristiche, in modo tale da descriverlo e utilizzare al meglio le informazioni per ulteriori indagini. Lo studio del problema prevede innanzitutto di prendere dimestichezza con il setup della strumentazione per svolgere indagini termografiche attive. Successivamente sono state effettuate molte prove su campioni di diversi materiali per poter individuare una corretta logica di analisi del problema. Strumenti fondamentali per eseguire le elaborazioni e le intepretazioni dei risultati sono la trasformata di Fourier e la meccanica delle vibrazioni, oltre alla conoscenza dei materiali in esame. I risultati ottenuti sono in grado di confermare la metodologia individuata mettendo in evidenza le diverse caratteristiche dei materiali. Lo studio del problema avviene attraverso dei tool presenti sul software Irta e attraverso l'implementazione di codici nell'ambiente Matlab.

Sulla base delle informazioni descritte precedentemente, il percorso realizzato per la stesura di questa tesi ha permesso di:

- acquisire dalla *letteratura* le informazioni riguardanti le tecniche di termografia, con particolare attenzione alle tecniche attive.
- utilizzare un setup di prova impiegato nelle analisi termografiche attive.
- utilizzare i software IRTA e Matlab.
- individuare una logica di analisi quantitativa.
- analizzare le *caratteristiche dei materiali* in esame attraverso lo studio delle risposte termiche del sistema.

Nei capitoli successivi verranno descritte le informazioni necessarie per raggiungere gli obiettivi prefissati in questa tesi e tutti i riferimenti bibliografici utili per la stesura dell'elaborato.

Indice

Elenco delle tabelle IV				
\mathbf{El}	Elenco delle figure V			
1	Introduzione			
2	Lo s	stato dell'arte	9	
	2.1	La fisica del problema $\ldots \ldots \ldots$	11	
	2.2	Metodologia Lock-in	18	
	2.3	$Metodologia \ Pulsed \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $	25	
	2.4	Le tecniche termografiche presenti in letteratura \hdots	27	
	2.5	Tipologie di processamento dei dati	31	
	2.6	Analisi e interpretazione dei risultati	41	
	2.7	Applicazioni sui materiali compositi	57	
	2.8	Applicazione della Lock-in nelle prove di trazione	63	
	2.9	Applicazione sui fenomeni corrosivi	66	
3	La s	strumentazione	69	
	3.1	La termocamera	73	
	3.2	La sorgente di calore	78	
	3.3	Il software per l'analisi del termogramma	81	
4	Analisi sperimentale		85	
	4.1	Logiche di analisi del problema	89	
	4.2	Analisi nel dominio della frequenza	97	
	4.3	Confronto tra i materiali	113	
5	5 Conclusioni e possibili sviluppi futuri 117			
Bibliografia 12				

Elenco delle tabelle

4.1	Griglia di prove
4.2	Griglia di prove
4.3	Griglia di prove
4.4	Griglia di prove
4.5	Frequenze delle intersezioni
4.6	Ampiezze del provino in acciaio DP600
4.7	Fasi del provino in acciaio DP600
4.8	Ampiezze del provino ceramico
4.9	Fasi del provino ceramico
4.10	Variazioni percentuali alla bassa frequenza 111
4.11	Variazioni percentuali all'alta frequenza
4.12	Analisi delle intersezioni

Elenco delle figure

1	telecamera ad infrarossi utilizzata per le analisi termografiche i			
1.1	campi di applicazione e contesti di utilizzo della termografia 3			
1.2	spettro elettromagnetico			
1.3	comparazione degli ambiti e delle tecniche termografiche presenti			
	in letteratura	6		
2.1	rappresentazione grafica del problema	12		
2.2	andamento della temperatura			
2.3	trasmissione del calore all'interno del materiale nel caso D \gg d $~.~~16$			
2.4	trasmissione laterale del calore all'interno del materiale $\ldots \ldots \ldots 10^{-10}$			
2.5	schema della tecnica Lock-in			
2.6	analisi dei contributi di $T_{sur} \in T_{temp}$	20		
2.7	analisi del contributo di T_{osc}	20		
2.8	onde con profilo quadrato	22		
2.9	spettri delle frequenze per diversi profili di onde quadre	23		
2.10	confronto tra due spettri di frequenza	24		
2.11	analisi della variazione del duty cycle	24		
2.12	schema della tecnica Pulsed	25		
2.13	tecnica di vibro termografia	27		
2.14	confronto tra la tecnica ottica e la tecnica ad ultrasuoni	28		
2.15	metodologia Induction Lock-in	29		
2.16	3 andamenti di temperatura delle onde termiche			
2.17	7 spettro delle frequenze per l'ampiezza del segnale dell'onda termica 33			
2.18	spettro delle frequenze per la fase del segnale dell'onda termica	34		
2.19	metodo dei quattro punti	35		
2.20	metodo della correlazione	37		
2.21	metodo della correlazione nel caso di onda quadra 	37		
2.22	a) analisi nel dominio delle frequenze b) analisi nel dominio del			
	tempo e delle frequenze	39		
2.23	modalità di esecuzione della prova	41		
2.24	1. segnale di riferimento - 2 e 3. onde termiche	42		
2.25	parametri di esecuzione delle diverse prove	42		
2.26	immagine del campione rilevata dalla termocamera $\ . \ . \ . \ .$	43		
2.27	immagini delle fasi del campione nelle diverse prove \ldots	44		

2.28	3 algoritmo per la stima delle caratteristiche di un difetto 45			
2.29) andamenti del contrasto termico in piastre di spessore 6 mm 4			
2.30	schema della logica della funzione di correlazione del contrasto \ldots 4			
2.31	31 prova sperimentale per la verifica dell'approccio della funzione di			
	correlazione del contrasto			
2.32	immagine rilevata dalla termocamera con gli andamenti di tempe-			
	ratura nelle zone d'interesse			
2.33	and amenti del contrasto termico per i pixel d'interesse \ldots .			
2.34	34 andamenti della funzione di correlazione del contrasto per i pixel			
	d'interesse \ldots			
2.35	definizione delle zone per l'analisi del Signal to Noise Ratio $\ . \ . \ .$			
2.36	3 andamenti del SNR per difetti presenti su pannello			
2.37	provino utilizzato per l'analisi			
2.38	andamenti delle fasi e delle ampiezze del provino in analisi $\ .\ .\ .$			
2.39	provino in materiale polimerico utilizzato per la simulazioni di			
	difetti circolari			
2.40	immagini delle fasi per l'investigazione di difetti simulati su un			
	pannello in resina epossidica			
2.41	provino in materiale polimerico per la simulazioni di difetti con			
	inserti			
2.42	immagini della fase di un pannello in CFRP con difetti simulati $\ .$			
2.43	immagini di un componente reale in CFRP			
2.44	risultati ottenuti per una prova con carico costante $\ldots \ldots \ldots$			
2.45	DFT di due prove per analizzare il campo elastico e plastico $\ .$.			
3.1	strumentazione per indagini termografiche attive			
3.2	strumentazione presente in laboratorio			
3.3	modello 3D della struttura del macchinario			
3.4	macchinario presente in laboratorio			
3.5	termocamera Flir			
3.6	modalità di riflessione			
3.7	modalità di trasmissione			
3.8	finestra di ResearchIR del frame rate in funzione della finestra di			
	risoluzione e della finestra di temperatura			
3.9	finestra di ResearchIR per i parametri necessari a definire la prova			
3.10	schermata di analisi del termogramma mediante Research IR $\ .$			
3.11	esempio di testa laser fornita con la strumentazione \ldots \ldots \ldots			
3.12	2 schermata di interfaccia Multides per il controllo del raggio laser . 7			
3.13	schermata di interfaccia Multides per il posizionamento della testa			
	laser			
3.14	interfaccia Multides per la definizione delle eccitazioni termiche .			
3.15	interfaccia del software Irta			

3.16	andamenti dello Spot Track per differenti pixel del termogramma		
	realizzati con Irta	82	
3.17	$^\prime$ schermata di interfaccia del software Irta per l'analisi Lock-in $$ 8		
4.1	flow chart dell'iter utilizzato per l'analisi sperimentale 8		
4.2	flow chart dell'approccio utilizzato per le prove sperimentali \ldots .		
4.3	provino in acciaio DP600 utilizzato per la caratterizzazione dei materiali	88	
4.4	provino ceramico Si_3N_4 utilizzato per la caratterizzazione dei ma- teriali		
45	passaggi per l'ottenimento dei risultati	89	
4.6	schermata di Irta dell'immagine dell'ampiezza ricavata con l'analisi	05	
1.0	Lock-in	90	
47	schermata di Irta dell'immagine della fase ricavata con l'analisi	00	
1.1	Lock-in	91	
4.8	esempio di grafico 3D su Irta per analizzare i valori di ampiezza	01	
1.0	dell'analisi Lock-in	91	
4.9	informazioni su Irta relative alla prova in esame	94	
4.10	andamenti dell'ampiezza ricavati con il tool ROI Extraction dalle		
	analisi Lock-in	94	
4.11	andamenti della fase ricavati con il tool ROI Extraction dalle ana-		
	lisi Lock-in	95	
4.12	variazione dei parametri della griglia di prove	97	
4.13	provino in acciaio DP600 durante gli esperimenti	97	
4.14	provino ceramico Si_3N_4 durante gli esperimenti	98	
4.15	and amento nel tempo generato dal software Irta per il Test 1	98	
4.16	and amento nel tempo ricreato con il codice Matlab $\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	99	
4.17	andamenti nel tempo ricreati con il codice Matlab del provino in		
	acciaio DP600	100	
4.18	andamenti nel tempo ricreati con il codice Matlab del provino		
	ceramico	100	
4.19	andamento nel tempo ricreato con il codice Matlab senza il tratto		
	iniziale	101	
4.20	andamento nel tempo ricreato con il codice Matlab della fase di		
	raffreddamento	101	
4.21	andamenti nel tempo senza il tratto iniziale ricreati con il codice		
	Matlab del provino in acciaio DP600	102	
4.22	andamenti nel tempo della fase di raffreddamento ricreati con il		
	codice Matlab del provino in acciaio DP600	102	
4.23	andamenti nel tempo senza il tratto iniziale ricreati con il codice		
	Matlab del provino ceramico	103	
4.24	andamenti nel tempo della fase di raffreddamento ricreati con il		
	codice Matlab del provino ceramico	103	

4.25	andamenti dell'ampiezza per le prove dell'acciaio DP600 10		
4.26	andamenti della fase per le prove dell'acciaio DP600 10		
4.27	' andamenti dell'ampiezza per le prove del ceramico 10		
4.28	3 and amenti della fase per le prove del ceramico $\ldots \ldots \ldots$		
4.29) confronto delle ampiezze tra i due materiali nelle diverse prove 10 $$		
4.30	ingrandimento del confronto delle ampiezze tra i due materiali nelle		
	diverse prove	106	
4.31	confronto delle fasi tra i due materiali nelle diverse prove \ldots .	107	
4.32	ingrandimento del confronto delle fasi tra i due materiali nelle		
	diverse prove	107	

Capitolo 1 Introduzione

Questo capitolo è di notevole importanza per descrivere in sintesi quello che è racchiuso all'interno del vasto mondo della termografia. Lo scopo è quello di fornire le basi sufficienti per affrontare la descrizione dei capitoli successivi che saranno focalizzati sull'analisi delle tecniche di termografia *attiva*.

Il principale campo di applicazione della *termografia* consiste nella realizzazione delle indagini. Concentrandoci in ambito meccanico, le indagini per analizzare un componente vengono suddivise in due grandi famiglie di prove. Le tipologie in questione prendono il nome di controlli *distruttivi* e *non distruttivi*. La scelta della tipologia influenzerà l'integrità del componente, ma sarà dipendente dalle analisi da effettuare e dai risultati che si vogliono ottenere. Focalizzando l'attenzione sulla "famiglia" delle tecniche non distruttive, oltre alla termografia sono presenti anche altre tecniche come ad esempio: test con ultrasuoni, test con correnti indotte, raggi X, test con liquidi penetranti, ecc.

La termografia è una tecnica di ispezione non distruttiva impiegata per effettuare analisi di diversa natura su componenti di molteplici applicazioni. Questo permette una buona versatilità di utilizzo della tecnica in diversi ambiti. Il punto di partenza, che è anche il principio alla base del funzionamento della termografia, consiste nella rilevazione delle immagini nello spettro dell'infrarosso. Successivamente si procederà con le elaborazioni dei dati acquisiti seguendo differenti logiche in base alla analisi da effettuare. In [22] sono riportati i principali campi di utilizzo della termografia, nel dettaglio: ambiti civili, materiali compositi, settore dell'elettrico, macchinari, energie rinnovabili e materiali/strutture metalliche. La tecnica verrà poi applicata per differenti scopi nei vari campi di utilizzo perchè gli obiettivi delle analisi sono differenti tra di loro. L'obiettivo principe di questa tecnica, come descritto in [22], è quello di effettuare delle diagnosi di danneggiamento oppure identificare una predizione del tempo di vita utile del componente in analisi. Queste considerazioni fanno parte del Condition-Based Maintenace (CBM), che rappresentano una serie di strategie per il monitoraggio di componenti. Le caratteristiche chiave di queste strategie sono le Condition Monitoring (CM) techniques, le quali permettono di valutare azioni di manutenzione basate su variazioni di trend delle macchine oppure su parametri del processo come: calore, rumore, vibrazioni, metallo perso/tasso di corrosione, ecc. Queste tecniche, però, sono allineate anche con quelle della *Structural Health Monitoring (SHM)* dove si considera il danneggiamento di una struttura per cause relative a eventi naturali oppure processi interni. Il contesto *SHM* prevede l'analisi delle strutture e dei sistemi meccanici mediante controlli nel tempo attraverso misurazioni periodiche, strumentazioni sensibili alle degradazioni e analisi statistiche dei dati. In questo modo si riesce a stimare lo stato di salute attuale e futuro del sistema in analisi.

La termografia, quindi, gioca anche un ruolo importante all'interno di tutte queste linee guida oltre all'aspetto delle *Non-Destructive Evaluation (NDE)* citato precedentemente. Un altro contesto di analisi che si può trovare in letteratura è quello delle *Destructive Physical Analysis (DPA)*, anche se nell'ambito della termografia sono quelle meno frequenti. La descrizione dei possibili campi di utilizzo e le corrispondenti applicazioni avviene attraverso una parte della tabella presente in [22] e rappresentata in figura 1.1.

Industry	Sub- industry	Application	Inspected for
	Building & Masonry structure	SHM/CM	Defect/ Degradation detection
			Energy loss/ Thermal bridging
			Leak/ Moisture detection
		NDE	Component performance/ Defect evaluation
Civil	Bridges	SHM/CM	Defect detection
0.111		NDE	Defect detection
	Tunnel	SHM/CM	Crack/Fracture detection
	Asphalt	SHM/CM	Crack/Defect detection
	Urban	SHM/CM	Structure/Feature/Energy loss detection
	Rail	NDE	Components defect detection/evaluation
		NDE	Impact defect/ Delamination detection
Composite	-		Dis-bonding/Patch repair
		DPA	Impact defect characterization
			Fatigue defect characterization
	Power	SHM	Defect detection (power plants/transformers)
Electrical			Soldering/Connection inspection
	Electronics	NDE	PCB/IC/Semi-conductors inspection
			Battery inspection
	Motors	СМ	Defect/Abnormal temperature
Machinery	Bearings	СМ	Defect/Abnormal temperature
Widemiter y	Nuclear	СМ	Defect/Abnormal temperature
	Heat Exchangers	СМ	Defect/Leakage/Abnormal temperature
Renewable	Solar	SHM	Structural defect/ Abnormal temperature
Kenewable	Wind	NDE	Structural defects
	allic erial/ - cture	NDE	Metal loss defect detection/characterisation
Matellia		NDE	Crack defect detection
Material/ Structure		DPA	Fatigue defect detection
3.1. 2000 V		NDE	Weld defect/Crack detection
		SHM/CM	Leakage detection

Figura 1.1: campi di applicazione e contesti di utilizzo della termografia

Prima di analizzare i differenti modi di utilizzo della termografia durante le prove risulta fondamentale capire il principio di funzionamento della telecamera ad infrarossi. La telecamera rappresenta il cuore della strumentazione e ha il compito di rilevare il calore emesso dalla superficie di un corpo. Infatti attraverso l'analisi della temperatura si effettueranno tutte le indagini d'interesse sui componenti. Qualsiasi oggetto al di sopra della temperatura dello zero assoluto, cioè maggiore di zero Kelvin, emette delle radiazioni elettromagnetiche. Dal punto di vista della lunghezza d'onda queste radiazioni ricadono all'interno del segmento dell'infrarosso. Dallo spettro elettromagnetico presente in [22] si mette in evidenza come il range della lunghezza d'onda d'interesse, che deve essere rilevato dalla termocamera ad infrarossi, sia compreso tra 0.75 - 1000 µm.



Figura 1.2: spettro electromagnetico

In [22] è descritto il primo approccio storico per l'analisi di questi fenomeni. Grazie agli studi di *Gustav Kirchhoff* si introdusse il concetto di corpo nero come una superficie ideale che non è in grado di riflettere o trasmettere, ma solamente capace di assorbire. Oltre ad essere un perfetto assorbitore di radiazioni presenta anche la caratteristica di ottimo corpo radiante. Con queste considerazioni diventa necessario introdurre il concetto di *emissività*, ovvero la caratteristica di un corpo di emettere energia rispetto a quella emessa dal corpo nero. Integrando l'equazione di *Planck* su tutto l'intero spettro delle lunghezze d'onda si ricava *l'intensità totale delle radiazioni* che sono emesse dal corpo nero:

$$E_b = \bar{\sigma} T^4 \tag{1.1}$$

dove $\bar{\sigma}$ rappresenta la costante di *Stefan-Boltzmann* e *T* la temperatura assoluta del corpo nero. Nella realtà nessun oggetto seguirà perfettamente la legge del corpo nero espressa in 1.1. Possono presentarsi dei casi molto simili ma solamente per particolari condizioni definite in un preciso dominio dello spettro.

Spostando l'attenzione al caso reale, affrontato in [22], si nota come l'emissività del corpo non sia l'unico parametro capace di influenzare l'analisi termografica. Questo è dovuto al fatto che si rientra in una situazione non adiabatica dove l'energia totale rilevata dalla telecamera è data da:

$$E_{TOT} = E_{obj} + E_{refl} + E_{atm} \tag{1.2}$$

e i parametri in 1.2 sono :

- E_{TOT} l'energia totale rilevata.
- *E*_{obj} l'energia emessa dall'oggetto.
- E_{refl} l'energia riflessa dall'ambiente circostante emessa dall'oggetto.
- E_{atm} l'energia emessa dall'atmosfera.

Lo studio del corpo reale si basa sulla logica di corpo grigio. Un oggetto con questa caratteristica viene descritto mediante un'emissività indipendente dal range di lunghezza d'onda nel quale la telecamera si trova ad operare. Infatti, l'emissività si valuta con un valore medio per tutta la lunghezza d'onda di acquisizione della telecamera. Il risultato che si ottiene sarà una mappa dell'intensità di energia presente sulla superficie del componente che si sta analizzando.

Una volta stabilito il ruolo chiave della telecamera ad infrarossi, all'interno della termografia, diventa opportuno analizzare i modi in cui questo strumento si troverà ad operare. Il primo permette di identificare la termografia come un approccio "attivo", in quanto il componente viene eccitato da una sorgente esterna. Lo scopo è quello di stimolare un'evoluzione termica all'interno del componente generando un profilo termico di riscaldamento oppure di raffreddamento. L'altra tipologia di analisi viene definita "passiva", dove non è presente nessuna sorgente esterna e il componente si troverà in modo naturale a differenti temperature rispetto a quelle dell'ambiente che lo circondano. Per il caso di tecnica passiva saranno le caratteristiche proprie del materiale a generare un contrasto termico rispetto all'ambiente circostante senza l'ausilio di nessuna stimolazione di calore. Queste due tecniche identificano anche due approcci differenti di analisi al problema. Per quanto riguarda le metodologie Lock-in e Pulsed presenti nell'approccio attivo, la letteratura affronta principalmente delle indagini riguardanti l'investigazione di difetti attraverso un'ottica molto qualitativa. Lo scopo di questa tesi sarà quello di definire una metodologia per ottenere risultati più quantitativi dalle analisi attraverso delle tecniche di termografia attiva.

La figura 1.3 presente in [22] permette di correlare i differenti utilizzi della termografia con le applicazioni nei diversi campi di utilizzo.

Introduzione



Figura 1.3: comparazione degli ambiti e delle tecniche termografiche presenti in letteratura

Ora diventa necessario focalizzare l'attenzione sulla termografia di tipo *attiva*. Questa tipologia di tecnica viene discussa nella letteratura mediante una classificazione in base alla sorgente di eccitazione. Utilizzando [22] come linea guida per la discussione di queste categorie possiamo notare come l'obiettivo sia sempre un riscaldamento del campione per rilevare i dati d'interesse attraverso la telecamera. La prima tipologia è definita termografia ottica, dove vengono impiegati dispositivi di eccitazione ottica come flash fotografici oppure lampade Alogene per stimolare il componente. I dispositivi appena citati hanno permesso la nascita delle due importanti metodologie di termografia attiva citate precedentemente: la Pulsed Thermography e la Lock-in Thermography. Queste due tipologie verranno analizzate in dettaglio nel capitolo successivo dato che rappresentano la base dello stato dell'arte per la trattazione della termografia di tipo attiva. Una variante della termografia ottica è la termografia laser, impiegata soprattutto per l'investigazione di difetti che si trovano in posizione perpendicolare alla superficie come ad esempio eventuali cricche. In questo caso le lampade eccitanti vengono sostituite con delle sorgenti laser. Un'altra tipologia di termografia attiva è la tecnica di termografia ad induzione, chiamata anche termografia con stimolazione a correnti parassite le quali sono in grado di realizzare il riscaldamento del componente. Di notevole impiego è anche la vibro termografia, che sfrutta l'eccitazione intergranulare del materiale nelle zone vicine ai difetti. Il risultato che si ottiene sono delle micro-frizioni che generano delle conversioni di energia meccanica in calore nell'intorno delle discontinuità del campione. All'interno di quest'ultima tecnica si trova anche una variante che è la termografia a microonde.

Si sono riscontrati vantaggi di notevole importanza da quando la termografia ha cominciato a prender parte alle analisi tecnologiche, tanto da generare delle continue evoluzioni per sfruttarla al meglio. In [5], le prime applicazioni della termografia attiva di tipo Lock-in risalgono alla fine degli anni '70. Questa evoluzione è avvenuta di pari passo con le evoluzioni delle performance dei calcolatori. Infatti, i calcolatori rappresentano un'altra parte vitale della strumentazione termografica in quanto grazie al loro impiego si realizzano le elaborazioni dei dati per effettuare le indagini del caso. L'evoluzione è stata dettata anche dalla necessità di analizzare materiali di nuova generazione utilizzati soprattutto in ambito aeronautico. Questa sinergia di evoluzioni, dettata sia da scenari tecnici che tecnologici, è stata fondamentale per continuare l'impiego di queste tecnologie e migliorarle. Tutto questo ha permesso di rimanere al passo utilizzando le tecniche termografiche nei campi applicativi d'interesse. Attualmente stanno nascendo nuovi campi di applicazione come ad esempio analisi legate a problemi corrosivi. L'applicazione della termografia in questi ultimi ambiti è ancora in fase di sviluppo come presentato in [22], ma i primi risultati ottenuti sono comunque positivi. La divulgazione delle innovazioni nel campo termografico avviene soprattutto attraverso articoli scientifici. In questo modo è possibile monitorare le nuove scoperte ed eventualmente utilizzare le innovazioni come punto di partenza per nuovi studi.

Capitolo 2

Lo stato dell'arte

In letteratura sono presenti molti articoli inerenti la termografia. Il loro scopo è quello di analizzare le diverse tecniche e cercare di confrontarle oppure migliorarle. I risultati ottenuti, però, riguardano diversi ambiti di applicazione della termografia. La ricerca delle informazioni per lo sviluppo di questa tesi si è concentrata nel campo delle applicazioni meccaniche. Per ottenere dei risultati più quantitativi, con l'applicazione delle tecniche *attive*, bisogna innanzitutto individuare quello che è stato affrontato in passato. Il punto di partenza dell'indagine consiste nell'identificazione degli articoli riguardanti le tecniche di termografia attiva con un focus alle metodologie di maggiore impiego per analizzare nel dettaglio quanto fatto fino ad ora. Una volta definiti gli articoli utili per le indagini si procede con una suddivisione in due gruppi principali in modo da circoscrivere le informazioni da ricercare. Il primo blocco è rappresentato da articoli necessari a definire una ricerca bibliografica delle tecniche di termografia Lock-in e Pulsed. Da questa serie di articoli si sono estratte principalmente le informazioni riguardanti la fisica del problema, le classificazioni delle tecniche termografiche, eventuali campi di utilizzo e le tecniche di processamento ed elaborazione per l'ottenimento dei risultati. Il secondo blocco riguarda gli articoli del Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT) i quali si sono rivelati utili soprattutto per raccogliere informazioni relative alle innovazioni nell'ambito della termografia. Buona parte degli articoli analizzati sono strutturati confrontando le diverse tecniche in esame sia dal punto di vista teorico che dal punto di vista dei risultati che si possono raggiungere. Gli articoli, inoltre, effettuano le analisi in diversi campi di utilizzo sottolineando la versatilità delle applicazioni delle tecniche termografiche. La lettura degli articoli è stata di fondamentale importanza per entrare nel dettaglio delle informazioni presenti attualmente nel mondo tecnologico della termografia attiva. L'elaborazione di queste informazioni ha messo in evidenza i punti chiave delle analisi fatte fino ad ora in modo da ottenere un'overview del problema e affrontare al meglio le successive analisi d'interesse per questa tesi.

In letteratura, come citato in [14], emergono due differenti tipologie di analisi nell'ambito della termografia. Queste condizioni saranno dettate dai risultati che si vogliono ottenenere. La tipologia di analisi è definita *metodo diretto* se l'obiettivo consiste nel ricavare gli andamenti di temperatura sulla superficie del materiale. Invece, se l'obiettivo consiste nell'analisi delle proprietà termiche del materiale e nelle caratteristiche geometriche di eventuali difetti presenti (profondità e dimensione) si attua un *metodo indiretto*.

In questo capitolo si analizzeranno nel dettaglio tutte le informazioni ricavate da un'accurata analisi blibliografica di quanto è stato affrontato nell'ambito della termografia *Lock-in* e *Pulsed*. Si descriveranno in maniera approfondita le tecniche d'interesse e i metodi di processamento utilizzati in letteratura per ottenere i risultati necessari alle analisi. Inoltre, si effettueranno dei cenni ad altre tecniche termografiche di tipo attivo individuate in letteratura per realizzare un confronto con le tecniche impiegate in questa tesi. Sarà anche di notevole importanza l'analisi nei diversi campi di applicazione in cui questi studi stanno evolvendo. Tutto questo ha permesso mettere in risalto come le tecniche *attive* siano un approccio molto versatile per differenti analisi, ma ancora in fase di forte sviluppo.

2.1 La fisica del problema

Il vantaggio nell'impiego di una tecnica di termografia *attiva*, rispetto ad una passiva, deriva dall'utilizzo di una sorgente esterna di calore per sollecitare termicamente il materiale in esame. In questa tesi verranno impiegate alcune tecniche di termografia che utilizzano diverse tipologie di eccitazioni termiche. I processi che si sviluppano quando il fronte termico raggiunge il materiale saranno di notevole importanza per capire i fenomeni fisici che si realizzano. La fisica che governa le interazioni tra le diverse parti in gioco è dettata dall'*equazione della conduzione del calore di Fourier*. Utilizzando [22] come punto di partenza per descrivere l'equazione nel campo monodimensionale si ottiene:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{2.1}$$

dove i parametri dell'equazione 2.1 sono:

- T il valore di temperatura in [K].
- α è la diffusività termica in $[m^2/s]$ espressa come:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \tag{2.2}$$

con k la conducibilità termica in [W/(mK)], ρ la densità in $[kg/m^3]$ e c il calore specifico in [J/(kgK)].

Il primo caso di studio analizza i fenomeni che nascono all'interno del materiale quando sottoposto ad un riscaldamento tramite un'onda termica con profilo sinusoidale. L'andamento dell'onda termica generato dalla sorgente eccitante, utilizzando [17] come riferimento, è descritto attraverso l'equazione 2.3.

$$q_0(t) = \frac{q_{max}}{2} (1 - \cos(2\pi f_e t)) \tag{2.3}$$

I parametri dell'equazione 2.3 sono:

- q_0 rappresenta la densità del flusso di calore.
- q_{max} rappresenta il valore massimo della densità del flusso di calore.
- f_e definisce la frequenza di modulazione della sorgente esterna che genera il riscaldamento.
- t definisce l'andamento temporale.

E analizzando i suoi due contributi si ottiene:

- una parte costante data da $\frac{q_{max}}{2}$ responsabile dell'incremento di temperatura.

• una parte armonica data da $\frac{q_{max}}{2} \cos(2\pi f_e t)$ responsabile della modulazione armonica dell'andamento di temperatura.

Il caso in esame è caratterizzato da un corpo opaco, omogeneo, di larghezza infinita e spessore L. Nell'ambiente è presente aria e il provino si trova disposto frontalmente all'eccitazione termica che genererà un flusso definito dall'equazione 2.3 il quale sarà in grado di realizzare un riscaldamento all'interno del provino. Nella figura presente in [17] si mette in evidenza quanto appena descritto.



Figura 2.1: rappresentazione grafica del problema

La soluzione dell'equazione della conduzione del calore di Fourier si ottiene imponendo le caratteristiche dell'esperimento descritte precedentemente e le condizioni al contorno del caso in analisi. I risultati ottenuti dalla soluzione dell'equazione descriveranno l'andamento di temperatura nel tempo e nello spazio. Le condizioni al contorno sono un aspetto fondamentale per la risoluzione dell'equazione e saranno diverse in ogni caso di studio. La loro definizione sarà necessaria soprattutto nei punti z = 0 e z = L della superficie irradiata del provino. L'analisi dell'evoluzione termica presente in [17] viene affrontata separando in due parti l'andamento, rispettivamente uno relativo al campo *transitorio* e uno relativo al campo *stazionario*. L'andamento di temperatura nel campo *stazionario* è rappresentato dalla seguente equazione:

$$T(z,t)_s = A_s e^{-z\sqrt{\frac{i2\pi f_e \rho c}{k}}} e^{i2\pi f_e t}$$
(2.4)

dove molti dei parametri presenti sono stati descritti nelle equazioni precedenti, mentre quelli ancora da identificare sono:

- $T(z,t)_s$ che descrive l'evoluzione nel campo stazionario della temperatura.
- A_s descrive l'ampiezza dell'andamento armonico della temperatura.

La parte di soluzione relativa all'andamento di temperatura nel campo transitorio si ricava attraverso la definizione dell'equazione differenziale alle derivate parziali, ma tenendo conto del riscaldamento costante generato dalla sorgente dell'eccitazione termica. In particolare:

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)_T}{\partial t} = \frac{q_{max}}{2} - \frac{T(z,t)_T - T_{am}}{R_{th}}$$
(2.5)

con rispettivamente:

- $T(z,t)_T$ che descrive l'evoluzione nel campo transitorio della temperatura.
- T_{am} che identifica la temperatura presente nell'ambiente dove si trova il corpo in analisi.
- R_{th} che rappresenta la resistenza termica del materiale.

La soluzione dell'equazione 2.5 mette in evidenza un parametro molto importante: la *costante di tempo*. In dettaglio si ottiene:

$$T(z,t)_T = T_{am} + \Delta T (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$
 (2.6)

e analizzando le parti presenti in 2.6:

• τ indica la costante di tempo, definita come:

$$\tau = \rho c R_{th} \tag{2.7}$$

• ΔT è un parametro definito come:

$$\Delta T = \frac{q_{max}}{2} R_{th} \tag{2.8}$$

Una volta analizzate nel dettaglio le parti che compongono gli andamenti nel campo del transitorio e dello stazionario non rimane che descrivere l'andamento di temperatura complessivo. Unendo gli andamenti descritti dalle equazioni 2.4 e 2.6 si ottiene l'andamento di temperatura nello spazio e nel tempo per il caso in esame.

$$T(z,t) = T(z,t)_T + T(z,t)_S$$
(2.9)

Attraverso l'immagine successiva, presente in [17], si analizzano due diversi andamenti di temperatura ottenuti con l'equazione 2.9 mettendo in evidenza il ruolo della costante di tempo definita in 2.7.



Figura 2.2: andamento della temperatura

La figura 2.2 è in grado di confrontare le diverse evoluzioni dell'andamento di temperatura in funzione delle caratteristiche del materiale. Costanti di tempo più basse permettono il raggiungimento di temperature più alte già nel campo del transitorio, rispetto all'andamento che si ottiene per valori di costanti di tempo più alte. L'incremento della temperatura nel campione avviene comunque in maniera rapida. Questo è dovuto ad un accumulo del flusso termico generato dalla sorgente nell'arco di tempo definito per il calcolo degli andamenti. La costante di tempo, quindi, risulta un indicatore di quanto velocemente la superficie del provino raggiunge la condizione di stazionarietà di temperatura. Lo studio dell'andamento di temperatura nel caso della termografia *Lock-in* riguarda il campo dello stazionario, dove la costante di tempo non sembra avere dei ruoli di notevole importanza. Eventuali variazioni dagli andamenti teorici appena analizzati servono per valutare particolari fenomeni all'interno del materiale, come ad esempio i difetti. La loro presenza genera uno spessore differente causando una diversa trasmissione del calore rispetto al materiale circostante.

Un altro caso di studio prende in considerazione la fisica del problema quando la sorgente dell'eccitazione è approssimabile ad una *Delta di Dirac*, condizione molto simile alla logica *Pulsed*. Il comportamento del materiale, in questo nuovo caso, si descrive sempre con l'equazione 2.1. La trattazione teorica è affrontata in [22] e l'andamento della temperatura per un mezzo semi-infinito, omogeneo e opaco risulta:

$$T(z,t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}exp(\frac{-z^2}{4\alpha t})$$
(2.10)

dove i parametri presenti in 2.10 e non ancora descritti nelle precedenti equazioni sono:

• T_0 è la temperatura ambiente in [K].

- Q è il calore fornito con l'eccitazione termica approssimabile ad una *Delta* di Dirac in $[J/m^2]$.
- e rappresenta l'effusività termica in $[Ws^{1/2}/m^2K]$, descritta da alcuni parametri presenti nell'equazione 2.1 e dettagliata successivamente.

$$e = \sqrt{\rho kc} \tag{2.11}$$

L'applicazione di queste due tipologie di eccitazioni all'equazione della conduzione del calore permette di comprendere il comportamento del materiale dal punto di vista della sua evoluzione di temperatura. Infatti, come presente nelle equazioni 2.9 e 2.10, gli andamenti saranno dipendenti sia dalle caratteristiche del materiale che dalla tipologia di eccitazione. Nella realtà risulta difficile imporre delle condizioni al contorno tali da descrivere in maniera esatta l'evoluzione degli eventi. In [22] vengono identificate le principali problematiche da tradurre con queste condizioni, come ad esempio le perdite di calore dalla superficie e la resistenza del contatto termico tra il campione e il punto di appoggio. Una soluzione utilizzata per evitare un'implementazione errata delle condizioni al contorno si basa sull'eseguire un'analisi mediante una logica di tipo *Pulsed*.

L'equazione della trasmissione del calore analizzata fino ad ora, però, considera il problema in ambito monodimensionale. Questa condizione permette un approccio matematico più semplificato ma non prende in esame il contributo di trasmissione del calore che può avvenire lungo le altre direzioni. In [22] viene affrontato il caso in cui si verifichi quest'ultima possibilità. Infatti, per condizioni come la presenza di un difetto all'interno del materiale, si generano dei flussi che non avvengono solamente lungo una coordinata del sistema di riferimento. La considerazione di questo fenomeno diventa importante nel caso in cui si vogliano ottenere delle valutazioni matematiche del problema il più possibile precise. L'analisi di questa situazione viene trattata mediante una condizione discriminante: la possibile dimensione del difetto (D) rispetto allo spessore del campione in analisi (d). Il fenomeno della trasmissione laterale del calore si può trascurare nel caso in cui la dimensione del difetto sia molto maggiore rispetto allo spessore del campione, ottenendo un flusso unidirezionale all'interno del materiale. Un esempio di questa condizione è rappresentata in figura 2.3, mentre la rappresentazione di una deviazione laterale del flusso di calore all'interno del materiale viene proposta in figura 2.4.



Figura 2.3: trasmissione del calore all'interno del materiale nel caso D≫d



Figura 2.4: trasmissione laterale del calore all'interno del materiale

Dal punto di vista della realtà, la condizione presente in 2.4 descrive un minore accumulo di calore in prossimità del difetto. Questo, sperimentalmente, equivale ad una minore temperatura registrata in quella zona sulla superficie del campione da parte della termocamera. In [22] viene citata una possibile soluzione a questo problema messa a punto da *Almond* e *Pickering*. L'idea è basata sull'utilizzo dell'equazione del calore in forma bidimensionale, anche se a tutti gli effetti si tratta di un problema nello spazio tridimensionale. Attraverso un apposito modello matematico si valuta la trasmissione del calore ipotizzando un trasferimento dalla zona di alta temperatura verso quella a temperatura minore, in modo da instaurare un equilibrio termico nella condizione stazionaria.

L'analisi della conduzione del calore sta alla base di quello che accade all'interno dei materiali durante le indagini con le tecniche di termografia *attiva*. In alcuni casi risulta di notevole importanza la conoscenza della fisica del problema. Grazie al suo studio diventa possibile ricavare matematicamente l'andamento di temperatura come affrontato in questo capitolo. Inoltre, la conoscenza dal punto di vista matematico del problema permette di effettuare correlazioni con i risultati rilevati sperimentalmente attraverso la termocamera. Lo sviluppo di modelli matematici più precisi nel descrivere la realtà permetterà di ricavare risultati sempre più simili a quelli che si ottengono con la termocamera. In questo modo sarà possibile migliorare la precisione delle analisi e sviluppare nuove metodologie di indagine nei diversi settori d'interesse.

2.2 Metodologia Lock-in

La termografia di tipo *Lock-in* è una tecnica termografica che rientra nella metodologia di tipo *attiva*. Le sorgenti di eccitazione termica non si trovano a contatto con il materiale da analizzare e quelle maggiormente utilizzate sono delle lampade Alogene oppure dei raggi laser. Come affrontato nel capitolo introduttivo questa non è l'unica tipologia di termografia attiva ottenibile attraverso queste eccitazioni. L'altra modalità di indagine è la tecnica *Pulsed*, che verrà dettagliata nella sezione successiva. Queste due tecniche, come affrontato in [25], fanno entrambe riferimento al principio della trasmissione del calore e della riflessione delle onde termiche ma differiscono per il profilo termico di riscaldamento e raffreddamento che viene generato dalla sorgente di eccitazione.

La termografia di tipo *Lock-in* è caratterizzata da una sorgente esterna che eccita il campione con un'onda di calore periodica assimilabile ad una sinusoide. Le caratteristiche di ampiezza e frequenza del profilo sinusoidale generato possono variare da caso a caso. Inoltre, le analisi effettuate utilizzando la tecnica *Lock-in* si svolgono in regime stazionario. Attraverso [25] è possibile analizzare lo schema della metodologia in esame e capire il principio di funzionamento.



Figura 2.5: schema della tecnica Lock-in

L'illuminazione periodica generata sul campione crea dei riscaldamenti che saranno modulati con un certo valore di frequenza. La prima propagazione delle onde termiche avviene nell'aria mediante il fenomeno radiativo e successivamente raggiungeranno la superficie del campione provocando un riscaldamento e propagando all'interno del materiale. L'indagine di eventuali anomalie nel campione avviene mediante l'analisi del valore del ritardo di fase dei segnali. Questa caratteristica, insieme a quella dell'ampiezza, è alla base per descrivere i segnali periodici come quelli utilizzati nella logica *Lock-in*. Come descritto in [22], i difetti o altre anomalie si comporteranno come delle barriere per la conduzione del calore all'interno del campione in quanto presentano delle caratteristiche di trasmissione che sono differenti da quelle del materiale che li circonda. Riportando queste considerazioni a livello di segnali termici, le informazioni trasmesse saranno diverse se derivano dal materiale difettato oppure da zone senza problematiche. Il ritardo di fase, quindi, rappresenta un parametro molto importante con cui analizzare l'evoluzione termica del campione rilevata dalla termocamera.

A questo punto diventa necessario focalizzare l'attenzione sull'andamento di temperatura della superficie del componente. Mediante [14] si mette in evidenza come analizzarlo attraverso due contributi. Nel dettaglio:

$$T_{sur}(t) = T_{tem}(t) + T_{osc}(t)$$
 (2.12)

dove i diversi contributi in 2.12 sono rispettivamente:

- T_{sur} è la temperatura raggiunta sulla superficie del componente.
- T_{tem} è la componente che descrive il cambiamento di temperatura sulla superficie del campione durante l'esperimento. Viene anche chiamata componente temporale media di temperatura. Una possibile descrizione matematica di questo contributo è affrontata in [14] utilizzando un'approssimazione polinomiale. In particolare:

$$T_{tem} = \sum_{m=0}^{M} [a_m t^m]$$
 (2.13)

con m il pedice del polinomio, a_m il coefficiente polinomiale e M il numero dell'ordine del polinomio.

• T_{osc} è la componente oscillatoria della temperatura sulla superficie del campione. Questo andamento viene anche chiamato segnale dell'onda termica.

In [14] sono analizzati in maniera separata i contributi presenti in 2.12 facendo riferimento a due casi di difetti presenti su un pannello. Gli andamenti sono rappresentati successivamente.







Figura 2.7: analisi del contributo di T_{osc}

L'andamento di temperatura ricavato matematicamente mediante la soluzione dell'equazione della conduzione del calore, descritta nella sezione precedente, prende anche in considerazione il valore di temperatura presente nell'ambiente. La metodologia *Lock-in* analizza solamente la parte oscillatoria dell'andamento della temperatura rilevata sulla superficie. In [14] viene affrontato questo problema riguardante la rimozione delle componenti di temperatura che non sono necessarie per l'analisi. Mettendo in evidenza la parte d'interesse si ottiene:

$$T_{osc}(t) = T_{sur}(t) - T_{tem}(t)$$

$$(2.14)$$

e i risultati presenti in figura 2.7, durante il lavoro sperimentale, si ottengo a seguito dell'approssimazione della componente T_{temp} . Un'altra possibilità di approssimazione suggerita è quella del metodo dei minimi quadrati. Successivamente si procederà alla sua rimozione dai valori di temperatura estratti con la termocamera. Questa procedura è molto importante perchè l'andamento del segnale dell'onda termica, T_{osc} , è molto simile all'andamento del flusso termico generato dalla sorgente termica. La differenza tra i due andamenti in termini di ampiezza e fase permetterà di realizzare tutte le analisi del caso.

Lo studio dell'andamento di temperatura affrontato in maniera matematica evidenzia alcuni parametri importati per l'applicazione di questa tecnica termografica. In [25] è presente l'andamento di temperatura risolvendo l'equazione di Fourier in campo monodimensionale per il caso di un'onda termica periodica. Il materiale in esame è considerato come semi-infinito e omogeneo. L'andamento della temperatura in funzione dello spazio e del tempo nel campo stazionario è dato da:

$$T(z,t) = T_0 e^{-\frac{z}{\mu}} \cos(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t)$$
(2.15)

dove i parametri dell'equazione 2.15, non tenendo conto di quelli già identificati precedentemente, sono:

- T_0 rappresenta il valore di temperatura iniziale al quale successivamente avverrà il cambiamento prodotto dall'eccitazione termica.
- λ è la lunghezza d'onda in [m].
- ω indica la pulsazione in [rad/s]. Definendo f la frequenza in [Hz] si ottiene:

$$\omega = 2\pi f \tag{2.16}$$

• μ la lunghezza di diffusione in [m] valutata come:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \tag{2.17}$$

L'andamento descritto mediante l'equazione 2.15 rappresenta l'evoluzione nel tempo della temperatura raggiunta dal campione. L'analisi considera l'andamento a regime trattandosi della metodologia *Lock-in*. Come descritto in [25], l'esperimento consiste nella stimolazione del campione attraverso una singola frequenza. Questo valore di eccitazione permette di investigare il materiale ad una determinata profondità che sarà definita dalla *lunghezza di diffusione* espressa nell'equazione 2.17. L'esperimento verrà ripetuto usando differenti frequenze per investigare diverse profondità nel materiale. Lavorando con frequenze basse si analizzerà il materiale in profondità mentre con frequenza più alte si analizzerà la parte sottostante alla superficie. In questo modo, variando la frequenza di eccitazione, si otterranno indagini più accurate che si traducono in migliori risultati dell'analisi. Questa logica di lavoro, però, rappresenta uno svantaggio dal punto di vista sperimentale quando è necessario realizzare molte prove.

La soluzione a questo problema viene affrontata in [13], dove si propone l'utilizzo di un'onda termica con profilo quadrato al posto di uno sinusoidale. L'esempio presente in [13] è raffigurato successivamente.



Figura 2.8: onde con profilo quadrato

Attraverso questa immagine è possibile introdurre il parametro del *duty cycle* per caratterizzare l'onda termica con profilo quadrato. Questo parametro è definito come il rapporto tra la durata del segnale non nullo e la durata del treno d'onde. Un duty cycle del 50% descrive un segnale che presenta uguali durate tra la parte nulla e la parte non nulla lungo l'intero periodo dell'eccitazione. Il vantaggio nell'applicazione di questa tipologia di eccitazione nella termografia *Lock-in* è possibile visualizzarlo analizzando il segnale nel dominio delle frequenze rappresentando il suo spettro. Utilizzando un'onda termica con un profilo sinusoidale si evidenzia come il maggiore contenuto di potenza termica inviato sul campione sia concentrato solamente su un'armonica. Nel caso di profilo ad onda

quadra, invece, vengono eccitate più frequenze ottenendo una ripartizione della potenza termica su più armoniche.

Questa considerazione si descrivere graficamente attraverso l'immagine presente in [13], che è in grado di evidenziare gli spettri delle frequenze ottenuti per diverse onde termiche di eccitazione.



Figura 2.9: spettri delle frequenze per diversi profili di onde quadre

Facendo riferimento alla figura 2.9 si nota come il valore della frequenza portante del treno d'onde influenzi l'andamento dei picchi nello spettro delle frequenze. Nel caso di frequenza portante minore rispetto a quella della sinusoide i picchi si trovano a frequenze basse. Il risultato finale, quindi, non sarà una sola deposizione del contributo energetico attraverso un'armonica come avviene nel caso del profilo sinusoidale. Quello che si genererà attraverso il profilo con onda quadra sarà la deposizione di contributi con minore energia che però sono ripartiti su più armoniche. Questo permette di investigare, mediante un opportuno metodo di processamento dei dati, diverse profondità del provino con un'unica eccitazione senza ripertere l'esperimento a diversi valori di frequenza.

In [13] vengono anche messi a confronto, con un maggiore livello di dettaglio, gli spettri delle frequenze di onde termiche con profilo quadrato presenti in figura 2.9. Questa immagine mette in risalto due aspetti fondamentali: il primo riguarda come la potenza termica si ripartisce sulle diverse frequenze mentre il secondo come in base alla frequenza utilizzata si realizzano profondità d'indagine diverse sul campione.



Figura 2.10: confronto tra due spettri di frequenza

Una volta confrontati i possibili spettri delle frequenze diventa necessario comprendere il ruolo del *duty cycle* negli andamenti. Queste considerazioni sono affrontate in [13] evidenziando le variazioni attraverso l'immagine successiva.



Figura 2.11: analisi della variazione del duty cycle

L'immagine mette in risalto come diversi valori di *duty cycle* generano differenti profili degli spettri. Con valori diversi da 50% si introducono degli ulteriori contributi di frequenze portanti nella parte bassa dello spettro a scapito del valore di potenza. Inoltre, si evidenzia come i cicli realizzati con valori del 25% e 75% presentano gli stessi contributi di potenza tranne nell'origine dello spettro. Infatti, il maggior contributo di calore depositato si visualizza per il valore di frequenza nulla. Quest'ultima condizione deriva dal fatto che nell'origine dello spettro è presente il valore medio del segnale in esame.

L'utilizzo dell'onda quadra come profilo termico di eccitazione presenta sicuramente dei vantaggi a livello sperimentale rispetto all'utilizzo di un'onda sinusoidale. Attraverso un'unica eccitazione del componente vengono investigate più frequenze, riducendo il numero degli esperimenti necessari per ottenere i risultati a diverse profondità. D'altro canto, per ottenere questi risultati bisogna implementare degli algoritmi di processamento dei dati adeguati a trattare questa tipologia di eccitazione.

2.3 Metodologia Pulsed

Un'altra tipologia di tecnica termografica attiva presente in letteratura è la metodologia Pulsed. In [14], la tecnica Pulsed prende anche il nome di Transient Infrared Thermography (TIRT). I fenomeni investigati dalle tecniche Lock-in e Pulsed sono identici. La principale differenza riguarda il profilo termico utilizzato per il riscaldamento della superficie. Come affrontato in [25], le sorgenti eccitanti utilizzate nella metodologia Pulsed sono principalmente dei flash fotografici in grado di generare un impulso corto di calore ma con potenze notevoli. La durata dell'impulso dipende dalle proprietà fisiche del campione e dalle possibili dimensioni di eventuali difetti presenti nel materiale. Di solito la durata può variare da circa 2 - 15 millisecondi fino a qualche secondo. Il fronte termico generato dalla sorgente di eccitazione raggiungerà la superficie del campione per poi penetrare al suo interno. Le possibili anomalie nel materiale verranno messe in evidenza da temperature differenti rispetto a quella della zona considerata priva di difetti. Un'altra grande differenza riguarda il campo di analisi del segnale dell'onda termica. Questa volta l'andamento della temperatura viene monitorato nel regime di tipo transitorio. In [25] è presente lo schema della tecnica termografica Pulsed.



Figura 2.12: schema della tecnica Pulsed

Risolvendo l'equazione di Fourier è possibile ricavare matematicamente l'evoluzione della temperatura. Se il profilo dell'eccitazione termica utilizzato è approssimabile ad una delta di Dirac si ottiene l'andamento descritto nell'equazione 2.10.

In [25] sono affrontati alcuni confronti con la tecnica termografica *Lock-in*. Una delle differenze riguarda la maggiore potenza impiegata per sollecitare termicamente il campione. Infatti la metodologia *Pulsed* è in grado di effettuare gli esperimenti molto più rapidamente. Bisognerà porre particolare attenzione alla tipologia di materiale da analizzare, in quanto l'elevata quantità di energia in gioco potrebbe danneggiarlo. Lo svantaggio della tecnica *Pulsed* lo si identifica nella ripartizione del contributo energetico dell'eccitazione su diverse frequenze. Il motivo è dovuto alla forma dell'eccitazione che risulta molto simile a quella realizzata con un profilo quadrato. La tecnica *Pulsed*, se trattata nel dominio della frequenza, permette di ricavare i risultati delle indagini in una forma simile a quella che si ottiene con l'applicazione della tecnica *Lock-in*. In questo caso la metodologia prende il nome di *Pulsed Phase Thermography (PPT)*.

2.4 Le tecniche termografiche presenti in letteratura

Le metodologie *Lock-in* e *Pulsed* descritte precedentemente contribuisco a definire alcune delle possibili tecniche termografiche *attive*. In [4] si evidenzia come l'utilizzo della termografia sia in forte aumento tra le possibili tecniche non distruttive. Infatti le *tecniche di termografia ad infrarossi* sono in continua evoluzione sia dal punto di vista delle metodologie che dal punto di vista delle applicazioni.

Le metodologie analizzate nelle sezioni 2.2 e 2.3 utilizzano principalmente una sorgente di eccitazione ottica per la generazione del segnale termico da inviare al campione in esame. L'utilizzo di queste tecniche per i materiali compositi è ancora limitato. Il motivo è dato dal fatto che le indagini termografiche forniscono dei risultati qualitativi con delle immagini. Nella letteratura sono presenti diversi articoli per l'applicazione su questi materiali con la volontà di migliorare i risultati sviluppando e studiando ulteriormente queste tecniche.

Una possibilità per risolvere le problematiche relative alle indagini da svolgere nei materiali polimerici consiste nell'applicazione di una sorgente di eccitazione ad ultrasuoni. L'impiego di queste sorgenti in letteratura viene identificato come *tecniche di vibro termografia* o *termografia ad ultrasuoni*. I difetti presenti all'interno del campione sono stimolati mediante l'utilizzo di onde meccaniche. La strumentazione utilizzata è raffigurata in figura 2.13 ed è presente in [19] insieme alla descrizione della tecnica.



Figura 2.13: tecnica di vibro termografia

Nelle tecniche citate precedentemente si realizza un'eccitazione del campione attraverso un proccesso di riscaldamento della superficie. Nel caso di termografia ad *ultrasuoni*, come descritto in [4], l'eccitazione avviene posizionando un trasduttore a contatto con il campione mediante un mezzo di accoppiamento che
può essere acqua. Le onde generate attraverseranno il campione e ritorneranno indietro per essere acquisite attraverso lo stesso trasduttore che genera l'eccitazione oppure mediante un altro adibito alla rilevazione del segnale. La presenza di eventuali difetti sarà messa in evidenza per complessi fenomeni generati con le onde. All'interno del materiale verrà sviluppato del calore che successivamente propagherà grazie ai fenomeni conduttivi. La termocamera sarà in grado di acquisire queste variazioni di temperatura rilevando le informazioni necessarie per le analisi. L'utilizzo della termocamera permette che questa tecnica rientri nelle tecniche termografiche ad *infrarosso*. Attraverso l'immagine presente in [23] si mettono in evidenza le differenze tra la termografia ottica e quella ad ultrasuoni.



Figura 2.14: confronto tra la tecnica ottica e la tecnica ad ultrasuoni

Come affrontato in [4], i risultati che si ottengono presentano delle dipendenze sia dalla profondità e posizione di eventuali difetti ma anche dalla struttura del componente. E' una tecnica di analisi in grado di generare una notevole quantità di potenza durante l'esperimento. Questa considerazione diventa un vantaggio per ottenere risutati più accurati in termini di profondità di ispezione rispetto a quelli che si possono ricavare mediante delle eccitazioni di tipo ottico. Dall'altra parte può rivelarsi uno svantaggio in quanto notevoli quantità di energia possono danneggiare il campione in analisi.

Un'altra metodologia presente in letteratura è la termografia Lock-in ad induzione. Attraverso [21] si nota come questa tecnica e quella Lock-in siano praticamente simili. La differenza deriva dalla modalità di generazione del calore. Il riscaldamento della superficie viene realizzato mediante un induttore attraversato da un profilo di corrente opportunamente definito per generare andamenti periodici di calore. Lo schema funzionale di questa metodologia è presente in [21] ed è rappresentato nella figura successiva.



Figura 2.15: metodologia Induction Lock-in

L'utilizzo di queste sorgenti di calore comporta però dei riscaldamenti superficiali disomogenei e problematiche di riflessione. Questi svantaggi nascono dalla disomogeneità del coefficiente di emissività del campione. Le soluzioni messe in atto per risolvere il problema sono principalmente due. La prima consiste nel focalizzare le analisi utilizzando opportuni strumenti come ad esempio l'immagine della fase. La seconda possibilità riguarda l'ottimizzazione del sistema per ridurre la nascita di queste problematiche. Da quest'ultima considerazione è stata messa a punto la tecnica definita Induction-Burst-Phase Thermography, dove attraverso dei miglioramenti nel riscaldamento e attuando una logica simile alla metodologia Pulsed si riescono ad ottenere migliori risultati. Utilizzando questa logica si analizzeranno gli andamenti della temperatura nel campo del transitorio. Il vantaggio nell'impiego di questa metodologia lo si osserva soprattutto per particolari applicazioni con materiali che presentano una bassa conducibilità elettrica. In questo caso la profondità di ispezione prende il nome di *penetrazione delle* correnti parassite e sarà fortemente dipendente dalle caratteristiche elettriche del materiale in analisi. Per campioni con elevati valori di conducibilità elettrica, come ad esempio i metalli, la penetrazione delle correnti indotte è inferiore rispetto a quella della lunghezza di diffusione termica analizzata nella tecnica Lock-in. I vantaggi di questo contributo sono notevoli nel caso di un materiale con caratteristiche completamente opposte alle precedenti rispetto all'impiego della sola sorgente ottica per effettuare il riscaldamento della superficie del campione. Un altro vantaggio relativo all'utilizzo di questa sorgente di riscaldamento deriva dalla quantità di energia generata. Mediante questo approccio la quantità è considerevolmente maggiore rispetto a quella che si genera attraverso un'eccitazione di tipo ottica. L'utilizzo di questa sorgente di eccitazione permette anche un vantaggio dal punto di vista dell'energia assorbita in quanto non sono presenti dipendenze dal coefficiente di assorbimento del materiale. Quindi, tenendo conto di tutte queste considerazioni, si può affermare che con opportuni materiali si riesce ad aumentare notevolmente la profondità di ispezione. In alcuni casi si riesce a raggiungere una profondità di indagine simile a quella generata attraverso la tecnica ad ultrasioni con il grande vantaggio di non porre a contatto le parti. Questa tecnica sta prendendo ampio spazio in letteratura con la stesura di nuovi articoli. Ad esempio in [2] si analizzano i fenomeni fisici che nascono durante gli esperimenti e si studia la trattazione matematica della fisica del problema.

Grazie all'analisi delle differenti tecniche possiamo notare come, durante gli anni, le evoluzioni tecnologiche hanno seguito due strade distinte: l'evoluzione nei materiali impiegati e lo sviluppo di nuove tecniche per analizzarli. La letteratura presa in esame non ha coperto tutte le possibili tecniche non distruttive collegate all'ambito della termografia *attiva* in quanto molte risultano ancora in fase di sviluppo. Con questo capitolo è stato possibile definire le caratteristiche di alcune tecniche termografiche presenti nell'ambito delle analisi non distruttive in modo tale da comprendere meglio sia i punti di forza che i punti di debolezza.

2.5 Tipologie di processamento dei dati

Il passo successivo all'esecuzione delle prove sperimentali consiste nel processamento dei termogrammi acquisiti. L'analisi dei dati riguardanti la temperatura sulla superficie del campione risulta un buon punto di partenza per ricavare le conclusioni alle indagini che si stanno effettuando. Uno studio più approfondito sui dati processati dal termogramma avviene attraverso ulteriori elaborazioni con strumenti presenti in letteratura, ma questa parte sarà illustrata nella sezione successiva. In questa sezione si darà spazio al processamento dei dati acquisiti con il termogramma. L'obiettivo delle tecniche di processamento è quello di estrarre delle informazioni d'interesse dai termogrammi in modo da realizzare le indagini. La natura delle informazioni da ricercare all'interno dei termogrammi è collegata principalmente alle tecniche termografiche adottate durante le prove. Le componenti di ampiezza e di fase del segnale dell'onda termica emessa dal componente sono gli strumenti utilizzati durante le tecniche di ispezione Lock-in. L'utilizzo degli strumenti dell'ampiezza e nella fase nella tecnica Pulsed avviene solamente nella variante Pulsed Phase Thermography, perchè altrimenti l'analisi si realizza attraverso una semplice indagine dei valori di temperatura raggiunti sul campione. Per la metodologia Lock-in sono presenti in letteratura diverse tecniche di processamento dei dati per l'ottenimento dei valori dell'ampiezza e della fase. L'obiettivo sarà quello di analizzarle e applicarle per mettere in evidenza quali sono i vantaggi e gli svantaggi che derivano dal loro utilizzo. Infatti il processamento dei dati anticipa l'analisi dei risultati ottenuti e ha la capacità di influenzare la loro precisione.

Il passo che precede l'analisi delle differenti tipologie di processamento consiste nel comprendere come avvengono le acquisizioni dei termogrammi. La termocamera rileva le informazioni con un certo intervallo di tempo in quanto la registrazione del valore di temperatura non avviene in maniera continua ma in maniera discreta con un'immagine e quella successiva. Questo si traduce in un parametro di notevole importanza per il reperimento dei dati, definito come "frame rate (f_s) " di acquisizione delle immagini. Il provino da analizzare verrà suddiviso in un determinato numero di pixel e, per un certo frame rate impostato durante la prova, la telecamera acquisirà il valore di temperatura per ogni pixel. Il risultato finale corrisponderà ad un andamento di temperatura per ogni pixel dell'immagine che compone il provino in analisi e l'acquisizione avverrà con una certa frequenza definita durante l'esperimento. A questo punto sarà possibile processare i dati e valutare eventuali strumenti per le successive analisi da effettuare.

Come descritto in [17], la tecnica di processamento più utilizzata e con maggiori potenzialità è quella della *trasformata di Fourier*. Il calcolo dell'ampiezza e della fase del segnale si effettua in modalità *off-line* in quanto il processamento avviene al termine dell'esperimento e non in concomitanza della prova sperimentale. Ad una data frequenza di modulazione dell'eccitazione termica, definita come frequenza di lock-in f_L , la trasformata di Fourier della sequenza delle immagini termiche rilevata dalla termocamera è definita come:

$$F_k(x,y) = \sum_{n=0}^{N-1} [F_n(x,y)e^{-j\frac{2\pi Kn}{N}}]$$
(2.18)

con $k = 1, 2, \ldots, N$. Gli altri parametri sono:

- $F_k(x, y)$ rappresenta la trasformata di Fourier della sequenza delle immagini termiche.
- $F_n(x, y)$ è la sequenza delle immagini termiche rilevata nel dominio del tempo dalla termocamera.
- N è il numero di campionamenti realizzato nell'arco di un periodo di Lock-in.
- K è la frequenza digitale, descritta come:

$$K = N \frac{f_L}{f_s} + 1 \tag{2.19}$$

A questo punto è possibile definire le grandezze di ampiezza (A_s) e di fase (ϕ) del segnale dell'onda termica.

$$A_s = \sqrt{[Re(F_k(x,y))]^2 + [Im(F_k(x,y))]^2}$$
(2.20)

$$\phi = atan(\frac{Im(F_k(x,y))}{Re(F_k(x,y))})$$
(2.21)

In [17] è rappresentato un esempio di applicazione di questa tecnica di processamento. L'elaborazione dei dati avviene considerando un provino in acciaio al carbonio ANSI 1045. Gli andamenti vengono ricavati matematicamente dalle equazioni e le informazioni relative all'onda termica del campione sono:

- una frequenza di lock-in di 0,12 Hz.
- delle costanti di tempo di $\tau_1 = 6$ e $\tau_2 = 12$.
- dei valori della componente armonica di $A_s = 2, \ \phi_1 = 30^\circ e \ \phi_2 = 60^\circ$.

L'esempio dell'andamento di temperatura sulla superficie del campione è rappresentato in figura 2.16 evidenziando le variazioni con due costanti di tempo diverse.



Figura 2.16: andamenti di temperatura delle onde termiche

Applicando la trasformata di Fourier a questi segnali si ottengono i valori di ampiezza e di fase. La rappresentazione delle grandezze in esame avviene attraverso il grafico dello spettro delle frequenze.



Figura 2.17: spettro delle frequenze per l'ampiezza del segnale dell'onda termica



Figura 2.18: spettro delle frequenze per la fase del segnale dell'onda termica

Dalle immagini 2.16 e 2.17 si mette in evidenza come l'ampiezza dell'andamento nel campo transitorio sia maggiore rispetto all'ampiezza presente nell'andamento del campo stazionario. Il motivo è dato dalla forte influenza del contributo transitorio nell'espessione dell'andamento totale di temperatura. Inoltre, l'andamento della temperatura nel transitorio è poco influenzato dall'eccitazione che viene generata sulla superficie del componente. Questo comporterà una valutazione dei valori di ampiezza e di fase nel campo dello stazionario. Lo strumento della trasformata di Fourier sarà applicato anche agli andamenti temporali di temperatura ricavati con la metodologia *Pulsed* nel caso in cui si voglia realizzare un'analisi *Pulsed Phase Thermography*.

La seconda tecnica di processamento presa in esame è quella del metodo dei quattro punti. La sua descrizione è affrontata in [17]. Venne introdotta nel 1992 da Busse e rappresenta un metodo approssimato della tecnica della trasformata di Fourier. Utilizzando quattro punti equidistanti, in un periodo dell'onda termica rilevata dalla termocamera, si calcolano i valori di ampiezza e di fase del segnale senza eseguire un passaggio nel dominio delle frequenze. Attraverso [7] si nota lo stretto legame presente con il metodo precedente. Nel metodo dei quattro punti il segnale è processato mediante l'utilizzo di soli quattro punti, mentre nel metodo della trasformata di Fourier il numero di punti utilizzato per l'analisi dipenderà dal frame rate di acquisizione delle immagini. Questo implica che il metodo dei quattro punti si può ricondurre al metodo della trasformata di Fourier ipotizzando di acquisire quattro immagini nell'arco di un periodo dell'onda termica. Se il segnale di riferimento e quello dell'onda termica fossero delle sinusoidi perfette, il calcolo dell'ampiezza e della fase si rivelerebbe un risultato esatto. I dati acquisiti nelle prove, però, presentano degli andamenti approssimabili a delle sinusoidi. Questo accade perchè l'acquisizione della termocamera non avviene in maniera

continuativa e perchè possono presentarsi dei disturbi esterni che influenzano l'andamento. Tenendo a mente queste considerazioni si è visto come un numero di 4 punti definisca un trade-off in termini di accuratezza e tempi di ottenimento dei risultati. Un numero maggiore di punti permette di migliorare il parametro del *SNR (Signal to Noise Ratio)*, che consiste in una grandezza utile per effettuare ulteriori elaborazioni dai risultati ottenuti. L'utilizzo di tre punti, invece, può richiedere un maggior tempo per la valutazione dei risultati. Nella figura successiva è rappresentato graficamente il processamento realizzato con questa tecnica.



Figura 2.19: metodo dei quattro punti

E' possibile notare la divisione in parti uguali del periodo dell'onda termica con i punti definiti nell'immagine 2.19 attraverso S_1, S_2, S_3, S_4 . Il vantaggio di questa tecnica di processamento è la sua velocità. Però, per ottenere una migliore qualità delle analisi, sarà necessario utilizzare più punti per approssimare l'onda termica.

Un'ulteriore tecnica di processamento utilizzata nell'ambito della termografia Lock-in è quella del metodo della correlazione. La sua trattazione avviene in [17]. Mediante questa logica di processamento dei dati si prendono in analisi solamente le armoniche fondamentali. Queste armoniche sono importanti perchè trasportano le informazioni principali e quindi sono d'interesse rispetto a quelle di ordine maggiore, che verranno soppresse nell'analisi. Il metodo sfrutta una correlazione tra il segnale dell'onda termica rilevato dalla termocamera e il segnale di riferimento dell'eccitazione. La correlazione è definita attraverso delle funzioni seno e coseno che permettono di estrarre i valori di ampiezza e fase per determinati valori di frequenza. Queste funzioni prendono il nome di funzioni di correlazione e consentono di ricavare le componenti in fase e in quadratura del segnale in esame. Tutti i parametri necessari per attuare questa tecnica di processamento sono descritti in [17]. Il punto di partenza è dato dalle funzioni di correlazione, definite come:

$$c(n)^{0^{\circ}} = 2sin(\frac{2\pi(n-1)}{N})$$
 (2.22)

$$c(n)^{-90^{\circ}} = 2\cos(\frac{2\pi(n-1)}{N})$$
 (2.23)

con n = 1, 2, ..., N. Il passo successivo alla definizione delle funzioni di correlazione consiste nel valutare come viene trattato il segnale dell'onda termica in modo tale da estrarre le informazioni per il calcolo dei valori dell'ampiezza e della fase. Gli operatori necessari a ricavare le componenti delle varie parti del segnale dell'onda termica sono:

$$S^{0^{\circ}} = \frac{c_s}{P_s N} \sum_{i=1}^{P_s} \sum_{n=1}^{N} [F_{i;n}(x, y) 2sin(\frac{2\pi(n-1)}{N})]$$
(2.24)

$$S^{-90^{\circ}} = \frac{c_s}{P_s N} \sum_{i=1}^{P_s} \sum_{n=1}^{N} [F_{i;n}(x,y)(-2)\cos(\frac{2\pi(n-1)}{N})]$$
(2.25)

dove i parametri presenti nelle equazioni 2.24 e 2.25 sono:

- $S^{0^{\circ}}$ è la componente relativa alla funzione di correlazione seno.
- $S^{-90^{\circ}}$ è la componente relativa alla funzione di correlazione coseno.
- c_s definisce un fattore di scala.
- $F_{i;n}(x, y)$ è l'immagine dell'onda termica per un dato periodo.
- ${\cal P}_s$ definisce il numero del periodo di modulazione.

Al termine della valutazione di queste caratteristiche si ricavano i valori dell'ampiezza e della fase dell'onda termica.

$$A_s = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{-90^\circ})^2} \tag{2.26}$$

$$\phi = \tan^{-1}(\frac{S^{-90^{\circ}}}{S^{0^{\circ}}}) \tag{2.27}$$

Attraverso l'immagine 2.20, presente in [17], si mettono in evidenza le equazioni appena analizzate correlandole alle diverse fasi del metodo in esame.



Figura 2.20: metodo della correlazione

In [13] è stato applicato il metodo della correlazione utilizzando come profilo del segnale di riferimento un'onda quadra. In questo caso si unisce il grande vantaggio presente nel metodo della correlazione con quello del profilo dell'onda quadra. Come analizzato nella sezione 2.2, l'onda quadra permette di stimolare il campione con diverse frequenze rispetto all'utilizzo dell'onda con profilo sinusoidale. L'unione con questa metodologia di processamento permetterà di ottenere i valori di ampiezza e di fase per una determinata frequenza d'interesse sollecitando il campione con una sola prova. Attraverso l'immagine successiva si evidenziano le fasi necessarie per realizzare questa logica di processamento.



Figura 2.21: metodo della correlazione nel caso di onda quadra

Dove si può notare come le funzioni di correlazione siano definite per determinate frequenze d'interesse che saranno eccitate attraverso il profilo dell'onda quadra. In questo modo si ricavano i valori di ampiezza e di fase in maniera molto simile a quanto già rappresentato in figura 2.20. L'utilizzo delle tecniche illustrate precedentemente avviene sia su dati rilevati sperimentalmente dalla telecamera che su andamenti ricavati attraverso delle analisi numeriche mettendo comunque in atto una logica di approccio *diretto*.

Le tecniche di processamento prese in esame fino ad ora utilizzano principalmente il dominio delle frequenze per ricavare i risultati d'interesse. In letteratura, come descritto in [24], si è scoperto come l'impiego congiunto del dominio delle frequenze insieme al dominio del tempo sia uno strumento utile per le indagini. Quando si effettua un'analisi nel dominio delle frequenze, la trasformata di Fourier è applicata all'onda termica del segnale della superficie del campione. Invece, per eseguire l'analisi nel dominio del tempo, diventa necessario applicare anche l'operatore della trasformata di Hilbert. La procedura identificata in [24] descrive tutti i paramentri necessari alla valutazione della fase. Il primo step consiste nella definizione della trasformata di Hilbert:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{T(x_r, \tau)}{t - \tau} d\tau$$
 (2.28)

dove con $T(x_r, \tau)$ si identifica il profilo termico di un pixel scelto come riferimento. Lo step successivo considera la valutazione del coefficiente di correlazione mediante la trasformata di Fourier inversa, in particolare:

$$Coefficiente \ di \ correlazione \ = IFFT\{T(x_r, \omega) * T(x_i, \omega)\}$$
(2.29)

dove è possibile identificare $T(x_r, \omega)$ come la trasformata di Fourier del segnale termico del pixel scelto come riferimento e $T(x_i, \omega)$ come la trasformata di Fourier della risposta termica in una precisa posizione spaziale del campione. Con * si fa riferimento al termine complesso coniugato. L'ultimo step consiste nell'applicare la trasformata di Fourier all'operatore di Hilbert ricavato in 2.28. A questo punto il valore della fase mediante questa tecnica di processamento vale:

$$\phi = tan^{-1} \left(\frac{IFFT\{H(\omega) * T(x_i, \omega)\}}{IFFT\{T(x_r, \omega) * T(x_i, \omega)\}} \right)$$
(2.30)

e attraverso la figura 2.22, presente in [24], si evidenziano i flow chart con i passaggi necessari per eseguire le analisi nei due domini d'interesse.



Figura 2.22: a) analisi nel dominio delle frequenze b) analisi nel dominio del tempo e delle frequenze

I vantaggi che derivano dall'utilizzo di questo approccio sono descritti in [16] e riguardano principalmente una migliore investigazione dei difetti. Rispetto all'approccio convenzionale nel dominio delle frequenze, l'analisi temporale utilizza per l'indagine tutta l'energia generata dal segnale di riferimento della sorgente. Il dominio delle frequenze, per sua natura, ripartisce la quantità di energia complessiva nelle armoniche del segnale. Quindi, a fronte di questo svantaggio, il dominio del tempo permette una migliore risoluzione e sensibilità nell'investigazione di eventuali difetti presenti nel materiale. I vantaggi vengono ulteriormente amplificati se si utilizza per l'indagine il parametro del *Signal to Noise Ratio*.

Un altro processamento presente in letteratura, seppur ristretto, consiste in una manipolazione del segnale di temperatura acquisito con la termocamera. Questa trattazione viene affrontata in [24]. L'andamento ottenuto, sia matematicamente che sperimentalmente, viene modellato ulteriormente attraverso una funzione di finestra a Gaussiana definita come:

$$g(t) = e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2(\sigma)^2}}$$
(2.31)

dove μ " indica la media e σ la varianza del segnale in esame. Per facilitare il nuovo modellamento dell'andamento di temperatura è necessario moltiplicare la trasformata di Fourier dell'equazione 2.31 con la trasformata di Fourier del segnale di temperatura presente in un punto scelto per l'analisi. Il nuovo andamento di temperatura nel dominio del tempo verrà espresso attraverso la trasformata di

Fourier inversa. Mettendo in evidenza questi ultimi due passaggi:

$$T = IFFT(G(\omega).T(x_i,\omega)) \tag{2.32}$$

dove $G(\omega)$ rappresenta la trasformata di Fourier di 2.31 e $T(x_i, \omega)$ la trasformata di Fourier dell'andamento di temperatura rilevato in un punto d'interesse. La manipolazione del segnale mediante questa logica genera come vantaggio un maggior contrasto nell'investigazione dei possibili difetti presenti in un componente. Lo strumento del contrasto è un altro dei possibili strumenti impiegati per effettuare uteriori analisi dai risultati ottenuti nel processamento dei dati. Anche in questo caso i vantaggi vengono ulteriormente amplificati se l'analisi verrà eseguita con lo strumento del Signal to Noise Ratio. Evidenziando le tecniche di processamento maggiormente impiegate in letteratura si nota come il processamento dei dati rilevati dalla telecamera sia un passaggio cruciale prima di effettuare le analisi del caso. L'applicazione di una tecnica rispetto ad un'altra dipenderà da molti fattori. Uno da non trascurare è dato dalle risorse a disposizione per effettuare le indagini, ma quello di maggior rilevanza risulta la qualità che si vuole ottenere. Quest'ultima considerazione è da correlare con gli strumenti d'interesse per eventuali successive analisi in modo da massimizzare sia i risultati del processamento che quelli delle analisi che seguiranno.

2.6 Analisi e interpretazione dei risultati

I capitoli analizzati fino ad ora descrivono le diverse metodologie di termografia attiva presenti in letteratura e le tecniche per processare gli andamenti di temperatura rilevati dalla termocamera. Il passo successivo, descritto in questa sezione, consiste nello studio degli strumenti per trarre ulteriori conclusioni dalle prove che si stanno effettuando. Questi strumenti sono differenti in base alle necessità delle indagini da svolgere. I valori di *fase* e di *ampiezza*, anticipati nella sezione precedente, sono alcuni degli strumenti più importanti per realizzare le analisi. Le altre tipologie di strumenti presenti in letteratura, ad esempio, permettono di identificare le dimensioni e la profondità dei difetti. Il loro utilizzo, quindi, diventa di fondamentale importanza per eseguire delle indagini non distruttive sul componente sia a livello del materiale che a livello di eventuali difetti presenti all'interno.

Gli strumenti più utilizzati sono le immagini generate dai valori dell'*ampiezza* e della *fase* del segnale. Queste immagini sono il risultato del processamento del segnale dell'onda termica realizzato attraverso le tecniche precedentemente analizzate. L'analisi consiste nel calcolare il valore di ampiezza e di fase per ogni pixel dell'immagine, analizzando la sequenza temporale composta dai frame d'interesse acquisiti con la telecamera. In questo modo si otterrà un'immagine contenente i valori per ogni pixel preso in esame durante la prova. In [3] sono rappresentati i risultati ottenuti dalle prove utilizzando un'onda sinusoidale come segnale di riferimento per l'eccitazione. Attraverso l'immagine successiva si mette in evidenzia come è avvenuta la prova sperimentale.



Figura 2.23: modalità di esecuzione della prova

Il campione utilizzato per l'esperimento permetterà di evidenziare la presenza di un danneggiamento situato all'interno del materiale e quindi non visibile esternamente. Questa condizione viene attuata sul provino attraverso una geometria con spessore non costante. Così facendo si metterà in atto un differente meccanismo di trasmissione del calore che si può anche descrivere con l'equazione 2.1. Attraverso l'immagine 2.24 si mettono in risalto i differenti segnali termici generati durante la prova.



Figura 2.24: 1. segnale di riferimento - 2 e 3. onde termiche

L'onda termica riflessa dal componente presenterà determinate caratteristiche di ampiezza e di fase per ogni pixel che definisce l'immagine del campione. In particolare nella zona dove sarà situato il danneggiameno si metterà in evidenza una diversa conduzione del calore per la presenza dell'aria al posto del materiale. L'onda termica incontrerà maggiore resistenza nel propagare all'interno di questo mezzo ritornando indietro oppure propagando lateralmente. In questo modo, nella zona circostante al difetto, saranno visibili le anomalie in termini di ampiezza e di fase del segnale rispetto alle zone non difettate. Per processare i dati è stato utilizzato il metodo dei quattro punti. Vengono effettuate diverse prove modificando per ognuna il valore di frequenza del segnale di riferimento. Il motivo risiede nell'utilizzo di un profilo sinusoidale per l'eccitazione termica. Con questo approccio, come già affrontato nella sezione della metodologia Lock-in, sarà necessario modificare la lunghezza di diffusione del segnale termico per effettuare le analisi a diverse profondità.

I parametri utilizzati durante la prova sono rappresentati successivamente.

Heating period	Modulation freq.	Recording time	Sampling freq.	Num of therm.
24 s	0.0417 Hz	36 s	1 Hz	36
72 s	0.0139 Hz	108 s	0.5 Hz	54
120 s	0.0083 Hz	180s	0.5 Hz	90

Figura 2.25: parametri di esecuzione delle diverse prove

Il termogramma del campione, in assenza della sorgente esterna di eccitazione, si presenta come in figura 2.26.



Figura 2.26: immagine del campione rilevata dalla termocamera

I risultati in termini di immagine di ampiezza e fase sono descritti in [3] in funzione delle differenti profondità di analisi. Lo scopo è quello di rappresentare i diversi risultati che si ottengono fino a mettere in evidenza il danneggiamento presente all'interno del provino.





(b) immagine della fase con periodo di 72 s



(c) immagine della fase con periodo di 120 s

Figura 2.27: immagini delle fasi del campione nelle diverse prove

La presenza del difetto risulta ben visibile con un periodo di 120 secondi. Come affrontato nei capitoli precedenti, l'utilizzo di una bassa frequenza attribuisce all'onda termica dell'eccitazione una maggiore capacità di penetrare all'interno del materiale. L'impiego di questi strumenti per effettuare le analisi porta con se dei vantaggi e degli svantaggi. In [14] si mette in evidenza come l'immagine dell'ampiezza sia notevolmente influenzata da variazioni locali di emissività oppure da riscaldamenti non uniformi. Questi svantaggi influenzano l'attendibilità dei risultati perchè la termocamera rileverà un andamento di temperatura che non sarà dipendente solamente da eventuali problematiche che si desidera identificare. L'immagine della fase, per come viene calcolata matematicamente, è in grado di rimuovere queste influenze. Infatti l'immagine della fase risulta ampiamente utilizzata rispetto all'immagine dell'ampiezza. L'impiego di questi strumenti, quindi, permette di rilevare la risposta termica del materiale in termini di immagine di ampiezza e di fase quando viene sollecitato con una sorgente termica ad una data frequenza.

In [25] si affrontano le analisi dei risultati nel caso in cui venga utilizzata la tecnica di tipo *Pulsed*. Queste informazioni sono già state anticipate nella sezione precedente. Le indagini sul provino si effettuano direttamente dall'andamento di temperatura che viene rilevato dalla termocamera. Con il trascorrere del tempo durante la prova, le zone d'interesse sul campione compariranno ad una temperatura differente da quella della zona non difettata. Il motivo, anche in questo caso, è dato dalle differenti caratteristiche tra materiale e difetto. Questa considerazione si ripercuoterà sulle onde termiche rilevate dalla termocamera. Uno studio presente in letteratura analizza come applicare lo strumento dell'immagine della fase alla logica di tipo *Pulsed*, visti i vantaggi che si possono ottenere dal punto di vista dell'interpretazione dei risultati. L'analisi è affrontata in [20] introducendo la variante della tecnica *Pulsed* definita come *Pulsed Phase Thermography*. L'utilizzo della trasfomata di Fourier permette di ricavare un segnale nel dominio delle frequenze dall'andamento in transitorio dell'onda termica ricavato con la

metodologia *Pulsed*. Seguendo questa logica si ottiene l'immagine delle fase e si applicano le stesse considerazione descritte nell'ambito della teoria *Lock-in* per analizzare i risultati ottenuti.

In letteratura sono presenti alcuni casi dove le analisi si effettuano mediante l'unione dei risultati ottenuti sperimentalmente con quelli ricavati matematicamente. Questo si traduce nella definizione di algoritmi utili soprattutto nel caso degli approcci di tipo *indiretto*. In [14], l'utilizzo in parallelo dell'approccio diretto attraverso un'analisi sia matematica che sperimentale permette di definire la dimensione e la profondità di eventuali difetti presenti nel campione. La fase del segnale dell'onda termica, in questo approccio, diventa un elemento fondamentale per la creazione dell'algoritmo. Infatti l'utilizzo di questo parametro permette di creare una *funzione obiettivo*. La logica da percorrere consiste nel minimizzare il più possibile il valore di questa funzione in modo tale da ottenere delle analisi accurate. Il punto di partenza consiste nell'inserimento di valori di tenativo per le grandezze della profondità e della dimensione del difetto. Su questi parametri si andrà ad applicare l'approccio matematico dell'equazione della conduzione del calore e successivamente si procederà al calcolo della funzione obiettivo. Attraverso la figura 2.28 si riescono a descrivere nel dettaglio tutti i passaggi dell'algoritmo appena descritto.



Figura 2.28: algoritmo per la stima delle caratteristiche di un difetto

In [15] viene descritto un altro algoritmo simile al precedente. L'obiettivo consiste nell'analisi del problema in maniera indiretta dove in questo caso i parametri da investigare sono: le caratteristiche del difetto, la conducibilità termica e il calore specifico. Come per l'algoritmo descritto precedentemente, il parametro della fase gioca un ruolo molto importante e verrà impiegato in una funzione obiettivo che dovrà essere minimizzata. L'utilizzo combinato di un approccio matematico con un approccio sperimentale diventa fondamentale per l'analisi della parte indiretta e il conseguente ottenimento dei risultati desiderati. Il punto di partenza sarà dato da dei valori di tentativo su cui eseguire le prime simulazioni e confrontarle con i risultati sperimentali.

Una problematica molto importante durante le analisi è data dal possibile rumore di fondo presente nel segnale acquisito dalla termocamera. Nel caso in cui fossero presenti dei difetti con un segnale molto debole, e paragonabile a quello del rumore di fondo, il rischio è quello di eliminare le informazioni di questo segnale durante il trattamento dei dati. In [6] è stata attuata una logica per risolvere questo problema cercando di distinguere il segnale debole dei difetti da quello di un probabile rumore di fondo. Le logiche utilizzate per l'analisi prendono in considerazione la definizione del contrasto termico e la logica della funzione di correlazione. L'unione di questi due strumenti permette di definire la funzione di correlazione del contrasto (CFC), che nel caso dell'articolo preso in esame è stata valutata per una metodologia con onda quadra. Il contrasto termico, come descritto in [6], è un indicatore utilizzato per descrivere i difetti mediante la differenza tra la temperatura di una zona difettata e una esente da difetti. Nel dettaglio si definisce come:

$$C_d(n) = T_d(n) - T_s(n)$$
(2.33)

con n = 1, 2, ..., N. I parametri dell'equazione 2.33 sono:

- N che indica la lunghezza della sequenza del termogramma acquisito con un certo intervallo di tempo.
- T_d è l'andamento di temperatura nella zona dove è presente il difetto.
- T_s è la temperatura di una zona esente da difetti e presa come riferimento.

Analizzando gli andamenti in [6] nel caso di due materiali si ottiene:



Figura 2.29: andamenti del contrasto termico in piastre di spessore 6 mm

Dalla figura 2.29 si evidenzia come le curve del contrasto termico siano influenzate sia dalla profondità a cui si trova il difetto che dalla tipologia di materiale. Difetti localizzati in prossimità della superficie genereranno un'onda termica con un profilo di temperatura maggiore rispetto a quella generata da difetti posizionati più in profondità. Questo è dovuto ad una parte del calore che non propaga all'interno del campione. Allo stesso tempo si nota come la dipendenza dalla tipologia di materiale abbia un effetto sulle differenti conduzioni di calore nei provini.

L'utilizzo della *funzione di correlazione*, come descritto in [6], permette di investigare difetti che generano un segnale debole. Infatti il parametro in analisi è stato impiegato per identificare la natura di un'evoluzione debole del contrasto termico. I motivi potrebbero corrispondere ad una zona difettata oppure ad un rumore di fondo. La *funzione di correlazione* viene definita in [6] come:

$$CF_{xy}(\tau) = [x(n), y(n-\tau)] = \sum_{n=1}^{M} x(n)y(n-\tau)$$
 (2.34)

dove τ rappresenta il tempo di ritardo di y(n). La funzione di correlazione è in grado di analizzare come gli andamenti tra i due segnali si modifichino con un certo τ . Il valore di massimo della funzione di correlazione si individua dove, per un dato valore di tempo di ritardo, il segnale $y(n - \tau)$ è molto simile a x(n). Il rumore che viene rilevato delle prove sperimentali presenta delle caratteristiche stocastiche con dei valori medi nell'intorno dello zero. Se il valore di massimo della funzione di correlazione avviene per $\tau = 0$ si può affermare che il rumore contenuto nei dati ispezionati presenta all'interno delle informazioni che sono rilevanti, mentre valori di picco in punti diversi dallo zero identificano che il rumore non contiene dei dati d'interesse per le analisi. A questo punto dopo aver definito le logiche utilizzate per l'approccio si passa all'analisi della *funzione di* correlazione del contrasto. La CFC utilizzata in [6] è definita come la funzione di correlazione tra l'evoluzione del contrasto termico di un pixel e un segnale di riferimento che presenta una caratteristica monotica crescente:

$$CFC_{xy}(\tau) = [C_{(x,y)}(n-\tau), R(n)]$$
 (2.35)

dove i parametri nell'equazione 2.35 rappresentano:

- CFC_{xy} la funzione di correlazione del contrasto per un pixel (x, y).
- $C_{(x,y)}(n)$ è l'evoluzione del contrasto termico del pixel (x, y).
- R(n) è la sequenza del segnale di riferimento. La caratteristica monotonica crescente è una retta con una pendenza positiva e passante per l'origine.

La funzione di correlazione del contrasto di un pixel in una zona difettata, per le considerazioni descritte precedentemente, presenterà un picco nell'intorno del tempo di ritardo uguale a zero. Se invece consideriamo una zona esente da difetti si nota come l'andamento di questa funzione assuma delle sequenze stocastiche con un valore medio circa nell'intorno dello zero e la posizione del picco in un punto stocastico del tempo di ritardo. Quindi, la posizione del picco e l'andamento della funzione di correlazione avranno caratteristiche diverse in base alle natura del pixel preso in analisi. In questo modo si individua se un pixel può contenere dei difetti oppure no. L'analisi avviene con un preciso τ e valutando un opportuno frame, in modo tale da ottenere il migliore risultato possibile. Attraverso l'immagine successiva, presente in [6], si mettono in evidenza tutte le fasi necessarie per attuare questa metodologia di analisi.



Figura 2.30: schema della logica della funzione di correlazione del contrasto

In [6] viene applicata la logica appena descritta su un provino in acciaio che simula la presenza di diversi difetti. Attraverso questa indagine si identificano i vantaggi e gli svantaggi dell'approccio proposto. Il campione in esame e la modalità di esecuzione della prova sono rappresentate di seguito.



Figura 2.31: prova sperimentale per la verifica dell'approccio della funzione di correlazione del contrasto

Focalizzando l'attenzione sull'immagine rilevata dalla termocamera e sugli andamenti di temperatura lungo tre linee prese come riferimento si nota come solo alcuni difetti presenti sul pannello vengono individuati durante le indagini.



(a) immagine rilevata dalla termocamera.



(b) andamento di temperatura della prima linea di riferimento



(c) andamento di temperatura della seconda linea di riferimento



(d) andamento di temperatura della terza linea di riferimento

Figura 2.32: immagine rilevata dalla termocamera con gli andamenti di temperatura nelle zone d'interesse

Il termogramma presente in figura 2.32 si verifica al 290esimo frame utilizzando un periodo di 11,6 s. Grazie a questa immagine si mette in evidenza come i difetti localizzati in profondità siano difficilmente individuabili con le condizioni utilizzate nella prova. Queste condizioni però sono volute per mettere in pratica l'approccio proposto e verificarlo. La prova viene realizzata con un riscaldamento non uniforme attraverso la non ottimale disposizione delle lampade rispetto al campione. Questo comporta un minore flusso di calore nella parte bassa del provino rispetto a quella posta in alto. Per quanto riguarda gli andamenti di temperatura presenti nella figura 2.32 si nota come alcuni difetti siano caratterizzati da un picco molto lieve e non apprezzabile rispetto al rumore del segnale acquisito. Utilizzando questo approccio si effettuano analisi più approfondite nel caso si rilevassero segnali di questa natura come accade ad esempio per i difetti D3, D6, D8 e D9. Il passaggio successivo, una volta acquisiti gli andamenti di temperatura mediante la termocamera, consiste nella valutazione del contrasto termico. Quest'analisi viene eseguita per alcuni pixel dove sono presenti i difetti e in altri due punti posizionati in una regione esente da difetti. Nel dettaglio:



1.2 D5 thermal contrast (°C) 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.0 2 9 10 11 12 0 3 4 5 6 7 8 time (s)

(a) and amento del contrasto termico per il difetto $D\mathbf{1}$

(b) and amento del contrasto termico per il difetto D5



(c) and amento del contrasto termico per il difetto D6



(e) andamento del contrasto termico per il difetto D8



(g) andamento del contrasto termico per la zonaS1



(d) and amento del contrasto termico per il difetto D7



(f) andamento del contrasto termico per il difetto D9



(h) andamento del contrasto termico per la zonaS2

Figura 2.33: andamenti del contrasto termico per i pixel d'interesse

Dai valori ottenuti si evidenzia quanto affermato precedentemente. Infatti gli andamenti ottenuti sono differenti nel caso di difetti ben visibili dalla termocamera rispetto a quelli che vengono rilevati con più difficoltà. Analizzando il difetto D1 si nota come i valori raggiunti dall'andamento del contrasto termico sono ben distinguibili dai valori raggiunti in tutti gli altri andamenti. Questo permette di evidenziare l'entità del contrasto termico di una zona in cui sono presenti delle anomalie. Una volta definita l'entità di una possibile zona difettata diventa necessario valutare quella esente da difetti per identificare l'ordine di grandezza del contrasto termico generato dal rumore. La valutazione avviene utilizzando le informazioni delle zone prese come riferimento. I valori ottenuti dimostrano come gli andamenti del contrasto termico di alcuni difetti sono molto simili a quelli ottenuti con il contrasto termico del rumore delle zone esenti da difetti.

Il passo successivo consiste nell'analisi della *funzione di correlazione del contrasto* per investigare gli eventuali difetti nascosti dal rumore presente durante l'esperimento. Analizzando gli andamenti per i pixel d'interesse si ottiene:



(a) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D1



(c) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D6



(e) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D8



(b) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D5



(d) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D7



(f) andamento della funzione di correlazione del contrasto per il difetto D9



(g) and amento della funzione di correlazione del contrasto per la zona S1



(h) andamento della funzione di correlazione del contrasto per la zona S2

Figura 2.34: andamenti della funzione di correlazione del contrasto per i pixel d'interesse

I risultati confermano le aspettative dell'analisi. Se la telecamera acquisisce un segnale debole e paragonabile con il rumore, la presenza di un difetto o meno sarà messa in evidenza attraverso il picco dell'andamento in prossimità del valore di zero nell'asse delle ascisse. La funzionalità dell'approcio è confermata con l'analisi del difetto D1 in quanto la sua presenza è assicurata dal termogramma rappresentato nell'immagine 2.32. Con questa certezza sarà possibile affrontare le analisi degli altri pixel d'interesse. Nel caso degli altri difetti, in particolare quelli meno visibili con la telecamera, si ha la certezza della funzionalità dell'approccio per la presenza del picco nel valore di zero. Per quanto riguarda le zone esenti da difetti si nota come gli andamenti della funzione di correlazione del contrasto siano differenti da quelli precedenti e con un picco non in prossimità dello zero. Il vantaggio di questo approccio riguarda un considerevole aumento di visibilità dei difetti durante la loro investigazione che altrimenti potrebbero essere trascurati nel caso in cui il loro segnale sia molto debole e alcune volte paragonabile a quello del rumore. Per ottenere un'analisi accurata bisogna identificare la lunghezza ottimale della sequenza del termogramma da acquisire. La motivazione deriva dalla fisica del problema della conduzione del calore. Infatti, come affrontato nella sezione 2.1, durante i fenomeni della trasmissione del calore possono verificarsi dei contributi di conduzione trasversale. Il valore di picco dell'andamento, quindi, tenderà a decrescere con una conseguente diminuzione della visibilità del difetto. Il valore della sequenza ottimale si può individuare mediante delle simulazioni numeriche oppure da precedenti prove sperimentali. Quest'ultima possibilità è da attuare soprattutto nel caso di campioni con materiali differenti, diversi spessori oppure l'utilizzo di molti livelli energetici durante la prova.

Un altro stumento per effettuare ulteriori indagini sui risultati ottenuti con il processamento dei dati acquisiti mediante la termocamera è il *Signal to Noise Ratio (SNR)*. Attraverso [11] si definisce il *SNR* come un parametro utile per stabilire se l'algoritmo impiegato nel processamento dei dati è adeguato all'applicazione in esame. La valutazione avviene mediante la capacità di fornire un sufficiente contrasto termico tra la zona difettata e una zona non difettata presa come riferimento. Il primo passo dell'analisi consiste nel definire queste zone d'interesse. Utilizzando un'immagine presente in [11] si ottiene:



Figura 2.35: definizione delle zone per l'analisi del Signal to Noise Ratio

La zona con la presenza del difetto dovrà generare un segnale (S-area) mentre la zona non difettata sarà caratterizzata da un rumore (N-area). Questa definizione nasce per la natura del parametro in esame. L'obiettivo rimane l'indagine della presenza del difetto attraverso il suo segnale che dovrà essere più visibile rispetto al rumore presente nella zona non difettata. Il passo successivo consiste nel calcolo del valore medio della fase nelle zone d'interesse dell'analisi. Definendo σ la deviazione standard del rumore, il SNR si considera in [11] come:

$$SNR = \frac{S}{N} = 20 \ \log_{10} \frac{abs(Sarea_{average} - Narea_{average})}{\sigma}$$
(2.36)

dove una buona investigazione dei difetti si ottiene attraverso dei valori di *SNR* maggiori di 0 dB tali da descrivere un buon contrasto termico del difetto rispetto a quello del rumore presente nell'area circostante. Questo approccio è lo stesso impiegato per analizzare la qualità della costruzione delle immagini per la televisione. Il vantaggio di questo strumento è l'ndipendenza da come il difetto appare in quanto potrebbe presentarsi di colore più freddo o più chiaro senza generare valori diversi.

Lo strumento del *SNR* si può ulteriormente impiegare per definire opportuni algoritmi di analisi come descritto in [9], dove l'obiettivo rimane l'analisi dei difetti attraverso l'immagine delle fasi. Una problematica nell'utilizzo di questo approccio riguarda la scelta dei pixel per la definizione della regione difettata e quella esente da difetti in modo da ottenere molti punti dove il difetto è visibile come segnale. Il rischio è dato dalla possibilità di escludere alcuni pixel che contengono delle informazioni importanti. L'algoritmo descritto in [9], per evitare queste problematiche, propone una serie di operazioni per porre uguale a zero le disuniformità superficiali e identificare le zone non difettate. Così facendo, si definiscono in maniera precisa i ruoli dei pixel in una determinata zona procedendo con un'analisi più precisa del valore del *Signal to Noise Ratio*. L'algoritmo presentato in [9] è utilizzato soprattutto per ricavare andamenti del *SNR* in funzione della profondità a cui si trovano i difetti. Le prove sperimentali sono eseguite su un pannello in materiale plastico (CFRP) e gli andamenti ottenuti sono in funzione delle diverse frequenze di analisi in modo da variare la profondità di indagine.



Figura 2.36: andamenti del SNR per difetti presenti su pannello

Le immagini presenti in 2.36 evidenziano che questa logica identifica i difetti attraverso i picchi del *SNR* in base alla frequenza di eccitazione utilizzata, che dovrà essere idonea per intercettare le anomalie presenti nel materiale.

In letteratura viene descritto anche un altro modo di rappresentare i risultati dell'immagine di ampiezza e di fase. In [8] si utilizza la dimensione del campione in analisi al posto dei pixel che lo definiscono. Questa soluzione non è molto impiegata ma permette di individuare la coordinata a cui si trova un determinato valore di ampiezza o fase una volta processato l'andamento dell'onda termica rilevato dalla termocamera. L'utilizzo di questo approccio diventa molto utile per eseguire dei confronti tra degli andamenti ottenuti sperimentalmente e quelli ricavati matematicamente con le equazioni della fisica del problema. In [8] si descrivono i risultati ottenuti con una prova eseguita su un provino in PVC simulando due difetti nella parte centrale. Il provino impiegato per l'esperimento è rappresentato nella figura successiva.



Figura 2.37: provino utilizzato per l'analisi

I grafici ricavati in maniera sperimentale vengono confrontati con quelli ricavati matematicamente analizzando gli andamenti per diverse frequenze di indagine.



(b) andamenti della fase e dell'ampiezza ottenuti numericamente

Figura 2.38: andamenti delle fasi e delle ampiezze del provino in analisi

Gli strumenti descritti in questo capitolo sono quelli maggiormente utilizzati in letteratura per affrontare ulteriori indagini dai risultati ottenuti con il processamento dei termogrammi. Le evoluzioni e le innovazioni nei diversi campi di applicazione stanno ottimizzando questi strumenti che getteranno le fondamenta per la definizione di nuove logiche di investigazione nell'ambito termografico.

2.7 Applicazioni sui materiali compositi

L'applicazione della termografia *attiva* nei materiali compositi prende ampio spazio recentemente. Il campo aerospaziale ha subito nell'ultimo periodo un forte cambiamento nella natura dei materiali impiegati e le motivazioni sono dettate dai vantaggi che derivano dalle loro caratteristiche.

In [3] si evidenzia come i materiali compositi siano un'alternativa molto valida all'impiego dei materiali metallici. La caratteristica che li ha resi importanti negli ultimi decenni è il rapporto tra la rigidezza e il peso. Valori molto alti fanno si che il loro utilizzo risulti in aumento sia nell'industria aerospaziale che in ambito automotive. Grazie alle loro proprietà si garantisce una riduzione di peso anche del 50%. Tra tutti i materiali compositi nei campi d'interesse quelli di maggiore impiego appartengono alla categoria dei Carbon Fiber reinforced polymer (CFRP). Sono presenti dei vantaggi anche a livello di indagini sperimentali grazie alla presenza di altre caratteristiche che li contraddistinguono. Una di queste è la loro bassa conducibilità termica che permette di non far propagare rapidamente nel materiale il calore generato in una zona. Molto importante è anche l'elevata emissività nel range dove la radiazione termica del corpo nero nell'infrarosso presenta il suo valore di massimo. Queste caratteristiche rendono i polimeri degli ottimi materiali per essere investigati sotto l'ottica tecnologica della termografia attiva. L'indagine di *difetti* o stress all'interno del materiale, rispetto ad altri campi, trova sinergia soprattutto con la logica della termografia Lock-in. Il motivo è dovuto principalmente all'impiego delle immagini dell'ampiezza o della fase per la ricerca delle eventuali problematiche all'interno del campione. L'interpretazione dei risultati, però, può rilevarsi difficile se il materiale presenta disomogeneità di emissività a livello superficiale. La soluzione a questo problema consiste nell'impiego dell'immagine della fase per l'analisi dei risultati sperimentali. La tecnica della termografia Lock-in, quindi, gioca un ruolo importante nelle fasi successive al processo di fabbricazione e trattandosi di una tecnica non distruttiva permette un'analisi rapida e precisa dello stato di salute del materiale. In questo modo si riescono ad attuare, in maniera preventiva al danneggiamento irreparabile, una serie di procedure per riparazioni o rinforzi sulla struttura. L'utilizzo dei materiali polimerici nella letteratura avviene soprattutto in ambito sperimentale. Le simulazioni attraverso approcci matematici permettono di sviluppare nuovi algoritmi di indagine e di testare nuove strumentazioni per migliorare la qualità dei risultati. Tutto questo garantisce un utilizzo in sicurezza del materiale con una buona qualità delle indagini effettuate. In [12] si mettono in evidenza ulteriori caratteristiche che motivano l'impiego di questa tecnologia per i materiali compositi.

L'obiettivo della simulazione di difetti all'interno del materiale rimane quello di creare un'interferenza tale da alterare la trasmissione delle onde della sorgente termica all'interno del materiale. Le interferenze vengono realizzate mediante delle variazioni di spessore oppure posizionando inserti di altri materiali nel campione. I provini utilizzati in letteratura presentano geometrie di forma rettangolare oppure a gradini. In [19] si analizza un campione in grado di simulare la presenza di difetti su una piastra in resina epossidica. La piastra ha dimensioni di 145 x 145 x 3 mm con difetti di diversa geometria simulati attraverso delle variazioni di spessore.



Figura 2.39: provino in materiale polimerico utilizzato per la simulazioni di difetti circolari

Lo strumento utilizzato per le indagini è l'immagine della fase. Le prove sperimentali impiegano la sorgente termica con due differenti frequenze di eccitazione, in particolare:



(a) immagine della fase a frequenza $0{,}1~{\rm Hz}$



(b) immagine della fase a frequenza $0{,}01~{\rm Hz}$

Figura 2.40: immagini delle fasi per l'investigazione di difetti simulati su un pannello in resina epossidica

Le immagini mettono in evidenza i risultati ottenuti investigando il materiale a differenti profondità. Per quanto riguarda un'ulteriore esempio di simulazione di anomalie nel materiale, [11] realizza delle analisi su un pannello in *CFRP* contenenente inserti di diversa geometria in Teflon per creare i difetti. Nell'immagine successiva è rappresentato il campione utilizzato durante le prove.



Figura 2.41: provino in materiale polimerico per la simulazioni di difetti con inserti

Dall'analisi delle immagini della fase ottenute a diverse frequenze di ispezione si visualizza la presenza del Teflon all'interno del pannello:



(a) immagine della fase a 0,01 Hz

(b) immagine della fase a 0,005 Hz



(c) immagine della fase a $0{,}003~{\rm Hz}$

Figura 2.42: immagini della fase di un pannello in CFRP con difetti simulati

Le scale delle immagini sono state adattate in modo da rilevare il massimo numero di difetti in ogni prova. In questo caso si nota come non tutti i difetti siano stati rilevati attraverso l'indagine sperimentale. La precisione sui risultati ottenuti durante l'esperimento è influenzata principalmente da due fattori: un riscaldamento del provino non uniforme e la geometria dei difetti impiegati. La prima problematica si visualizza nonostante vengano utilizzate le immagini della fase. Anche se questi strumenti sono in grado di ridurre le disuniformità del riscaldamento, il posizionamento errato della sorgente di calore non permette di ricavare dei risultati pienamente soddisfacenti. La seconda problematica deriva dalla geometria dei difetti utilizzati per la simulazione. Difetti di grandi dimensioni e non localizzati in profondità vengono indentificati con più facilità durante l'analisi rispetto a quelli che presentano caratteristiche opposte.

L'investigazione dei materiali polimerici nel caso di componenti reali viene affrontata in maniera ridotta nella letteratura. Le analisi, però, sono di notevole importanza perchè fanno emergere i vantaggi e gli svantaggi delle tecniche quando sono applicate a componenti reali e non a provini di laboratorio. In [5] è rappresentata l'immagine della fase di un componente in CFRP utilizzato su un aereo Dornier Do 328 applicando la tecnica termografica *Lock-in*.



(a) disegno tecnico del componente



(b) immagine della fase del componente

Figura 2.43: immagini di un componente reale in CFRP

Le immagini in figura 2.43 evidenziano le parti racchiuse all'interno del componente. L'analisi, quindi, permette delle ispezioni che sarebbero impossibili da effettuare esternamente.

Da questi risultati si dimostra come l'impiego della tecnica *Lock-in* sui materiali compositi sia ancora in fase di sviluppo necessitando di molta sperimentazione per ottenere risultati sempre più precisi. Infatti ancora oggi si ottengono analisi qualitative senza descrivere in maniera approfondita le indagini che si stanno effettuando. Un buon risultato dagli esperimenti deriva anche dal modo in cui si effettuano. Come analizzato in [11], il posizionamento corretto della sorgente di calore rispetto al provino diventa critico per evitare riscaldamenti non uniformi. Oppure l'ambiente nel quale si realizzano gli esperimenti deve essere adeguato per evitare influenze termiche esterne che comporterebbero risultati non attendibili. Le considerazioni appena descritte, che comunque sono di carattere generale, dovranno essere alla base per l'ottenimento di risultati affidabili. L'utilizzo delle tecniche ad ultrasuoni costituisce una valida alternativa per ottenere risultati più precisi su questi materiali. L'esperienza e lo studio approfondito del problema saranno alla base per il miglioramento e l'ottimizzazione della tecnica *Lock-in* nelle diverse applicazioni.

2.8 Applicazione della Lock-in nelle prove di trazione

Un altro campo di notevole importanza per l'impiego della termografia *Lock-in* è quello dell'analisi della propagazione di cricche. Le indagini sperimentali effettuate in questi ambiti avvengono con delle macchine simili a quelle impiegate per le prove di trazione. I campioni, durante gli esperimenti, sono sottoposti a sollecitazioni di trazione e compressione per studiare le caratteristiche proprie del materiale. Il modo in cui il materiale risponde a queste prove ha permesso di sviluppare degli approcci di studio che utilizzano la termografia, descrivendoli accuratamente in letteratura. Così facendo, attraverso una tecnica di indagine non distruttiva, si riesce ad analizzare lo stato di salute del materiale ed eventualmente studiarne i limiti nel campo della fatica.

In [18] si descrive la capacità del materiale di rilasciare energia quando sottoposto a fenomeni di deformazione. Questo rilascio può avvenire anche quando i fenomeni in questione sono strettamente localizzati come nel caso della fatica. La grande differenza rispetto all'analisi della Lock-in affrontata fino ad ora sta nel modo in cui l'energia viene generata. Infatti l'approccio termografico al problema si può anche realizzare senza una sorgente esterna di calore. Il motivo è dovuto ai fenomeni che nascono durante le problematiche di fatica. Il comportamento plastico e l'accrescimento della frattura generano una quantità di energia rilevabile attraverso la telecamera. Gli eventi che generano un danneggiamento all'interno del materiale, associabili a condizioni di microplasticità localizzata, creano delle variazioni di temperatura a livello superficiale che saranno rilevate dalla termocamera. Attraverso questi incrementi di temperatura si può identificare il passaggio da un comportamento elastico a quello plastico e durante questa transizione vengono acquisiti notevoli incrementi di energia. L'energia è associata in maniera diretta ai processi di deformazione plastica che sono correlabili a processi di nucleazione e accrescimento della cricca. Questa logica, quindi, permette di utilizzare la termografia sotto un altro aspetto di analisi. Attraverso i grafici successivi, presenti in [18], si evidenziano le correlazioni tra gli andamenti di temperatura e gli andamenti energetici presenti sul provino in analisi.


(b) andamento dell'energia

Figura 2.44: risultati ottenuti per una prova con carico costante

La rilevazione dell'insorgere del gradiente di temperatura diventa uno strumento importante per determinare l'ingresso nel campo plastico del materiale. Infatti l'identificazione di questa informazione permette analisi approfondite sul limite di fatica. In letteratura, sulla base delle considerazioni appena descritte, sono stati valutati algoritmi che sfruttano la logica Lock-in per effettuare le analisi. Ad esempio in [26] si evidenzia come l'utilizzo del laser sia in grado di realizzare l'indagine su diversi punti d'interesse del campione. Attraverso una sincronizzazione tra i segnali generati dal laser e quelli acquisiti dalla termocamera si ricavano le informazioni per effettuare le valutazioni del caso. L'algoritmo proposto sarà in grado di: identificare, localizzare e quantificare una cricca definendo questa zona come immagine di discontinuita. L'ottenimento di queste informazioni sarà possibile solo quando si determineranno le immagini dell'ampiezza mediante la tecnica termografica Lock-in. In [1] si è giunti a importanti conclusioni analizzando i dati del segnale di temperatura processati mediante la trasformata di Fourier. Lo studio effettuato riguarda l'analisi delle armoniche presenti negli spettri di frequenza ottenuti su prove in campo elastico e in campo plastico. Nel caso di un comportamento elastico il contributo maggiore di temperatura si trova in prossimità dell'armonica corrispondente l'eccitazione del campione. Durante l'esecuzione di prove in campo plastico si identificano contributi di temperatura anche sulle armoniche successive alla prima. Un esempio di quanto appena descritto è rappresentato attraverso lo spettro presente in [1].



Figura 2.45: DFT di due prove per analizzare il campo elastico e plastico

La presenza del picco a 30 Hz, nel caso del campo elastico, è correlabile a vibrazioni del macchinario durante la prova. Invece il contributo che si verifica a frequenza nulla identifica il valore medio della temperatura.

Le analisi presenti in letteratura riguardano principalmente materiali compositi e acciaio. Gli studi relativi alle analisi di fatica dei materiali attraverso approcci simili a quelli descritti in questa sezione sono in continua evoluzione. Inoltre, come messo in evidenza dagli articoli, le tecniche termografiche utilizzate per gli studi possono variare da caso a caso. La termografia, quindi, diventa uno strumento con enormi potenzialità anche sotto questo aspetto di ricerca. Il suo miglioramento nel tempo permetterà di ottenere risultati più precisi dalle indagini e aumentare le conoscenze in questi ambiti.

2.9 Applicazione sui fenomeni corrosivi

Lo studio dei fenomeni corrosivi attraverso le tecniche termografiche *attive* sta prendendo piede solo recentemente. Le problematiche relative alla corrosione consistono in una perdita di metallo sul componente. Questa logica, come indicato in [22], permette di analizzare il problema come una variazione di spessore sul campione in esame. L'ipotesi alla base di questo approccio ammette che il fenomeno corrosivo non crei delle significative alterazioni sulle caratteristiche termiche del materiale. Così facendo si può descrivere l'andamento teorico di temperatura mediante il modello monodimensionale analizzato precedentemente. Questo avviene sia per la zona esente dal fenomeno corrosivo che quella dove si ritiene necessario descriverlo mediante una variazione di spessore. In letteratura, come descritto in [22], è stato introdotto il parametro della *sensibilità generale alla perdita di materiale* per descrivere i fenomeni corrosivi. La sua descrizione avviene di seguito.

$$\frac{\Delta L/L}{\Delta T/T} \approx 1 \tag{2.37}$$

L'equazione introdotta in 2.37 correla un incremento di temperatura dell'1%in una zona corrosa con una corrispondente perdita di materiale dell'1%, per un tempo che tende all'infinito. Quindi, con il contributo di $\Delta L/L$ si fa riferimento ad una perdita di materiale relativa ad un incremento di temperatura $\Delta T/T$. Gli approcci dell'analisi, seguendo le logiche presenti nel campo termografico, sono suddivisi in *diretto* e *indiretto*. L'analisi quantitativa in questo ambito corrisponde alla valutazione del metallo perso per il fenomeno corrosivo, rientrando in un approccio di tipo indiretto visto che l'obiettivo consiste nel reperimento delle informazioni relative al materiale. L'approccio diretto, invece, rimane collegato alla conoscenza dell'andamento di temperatura realizzato dal campione. Una volta noti i risultati sperimentali dal termogramma, oppure reperendoli mediante modelli matematici, si possono ricavare tutte le informazioni necessarie per risolvere l'approccio indiretto. I fenomeni corrosivi si possono sviluppare anche sulla parte interna del materiale, cioè in superfici nascoste alla vista durante eventuali controlli visivi. Nella letteratura sta prendendo piede anche l'analisi di questi casi con particolare attenzione alla ricostruzione della superficie nascosta e soggetta al fenomeno corrosivo. L'approccio descritto in [22] introduce un parametro definito coefficiente di riflessione termica in grado di modellare in maniera più dettagliata le zone corrose come difetti di diversa natura in base alle caratteristiche di effusività termica che si sceglieranno. In particolare:

$$\Gamma = \frac{e_m - e_d}{e_m + e_d} \tag{2.38}$$

dove e_m rappresenta l'effusività termica del materiale solido mentre e_d l'effusività termica del difetto. Un esempio di modellazione del fenomeno corrosivo mediante

questo approccio avviene attraverso un $\Gamma = 1$, che corrisponde ad un $e_m \gg e_d$. Così facendo si descrive la mancanza di materiale come un difetto contenente all'interno aria.

L'analisi dei fenomeni corrosivi attraverso un approccio termografico permette di aumentare notevolmente la capacità di monitoraggio delle strutture riducendo i possibili danneggiamenti irreparabili con opportuni interventi di manutenzione. Gli impieghi maggiori avvengono per impianti a gas o per impianti che effettuano il trattamento di oli. Visti i campi di utilizzo bisognerà porre molta attenzione all'uso delle sorgenti termiche per lavorare in completa sicurezza. Quindi, l'unione dei vantaggi legati all'applicazione di una tecnica non distruttiva e termografica fanno si che le analisi dei fenomeni corrosivi siano in fase di forte sviluppo utilizzando questi approcci. Allo stato attuale non sono presenti molte informazioni in letteratura, ma saranno divulgate man mano che avverranno scoperte nei diversi settori di studio.

Capitolo 3

La strumentazione

Dopo un'analisi approfondita dello *stato dell'arte* riguardante la tematica d'interesse si procede con il passo successivo che consiste nello studio della *strumentazione* utilizzata per le analisi sperimentali. La trattazione generale sulla strumentazione per la realizzazione delle indagini termografiche è stata in parte affrontata nei capitoli precedenti. Le informazioni, però, vengono dettagliate in maniera sparsa visto che l'analisi della strumentazione non è l'obiettivo del capitolo dello *stato dell'arte*. Successivamente si procederà con una breve riepilogazione degli strumenti necessari prima di descrivere quelli impiegati nelle prove sperimentali di questa tesi.

Attraverso l'immagine presente in [24] si mettono in evidenza gli strumenti utilizzati nelle tecniche termografiche con un approccio di tipo *attivo*.



Figura 3.1: strumentazione per indagini termografiche attive

Gli strumenti impiegati nelle indagini termografiche dipendono dalla tipologia di tecnica termografica che si vuole attuare. Il primo, nonchè il cuore di tutta la strumentazione, è la *telecamera ad infrarossi*. Questo strumento è fondamentale

sia nelle logiche *attive* che *passive*. Infatti grazie alla termocamera si rilevano gli andamenti di temperatura emessi dal campione. Nel mondo della termografia sono presenti diverse tipologie di termocamere dove ognuna presenterà delle caratteristiche diverse. La scelta della termocamera dipende soprattutto dal campo di applicazione e dalle risorse disponibili da investire per effettuare le indagini. Il secondo strumento è la sorgente di eccitazione. Il suo utilizzo è associato solamente alle logiche di tipo attivo. L'eccitazione termica sul campione avviene maggiormente con lampade Alogene, flash, induttori e laser. Grazie al loro impiego si realizzano profili termici di riscaldamento con differenti caratteristiche che saranno dipendenti dalla tecnica termografica da adottare per l'analisi. Un altro strumento è *l'unità di controllo*, che risulta vitale per il collegamento e per la gestione dei componenti del sistema. Le informazioni e le parti da gestire durante le prove sperimentali sono molteplici. Ad esempio la quantità di dati da acquisire è influenzata da parametri come il numero di pixel con cui si descrive il campione, il frame rate di acquisizione e la lunghezza della prova. La parte di processamento dei dati, invece, avviene attraverso un opportuno software installato su un computer che risulta collegato all'unità di controllo. In questo modo si definisce un'interfaccia con l'utente per gestire tutte le operazioni della prova e processare i dati. L'unità di controllo, quindi, gioca un ruolo fondamentale per le acquisizioni è avrà un impatto sul processamento. Inoltre, il tempo di calcolo per l'elaborazione dei dati è un parametro da non trascurare. Unità di controllo e computer più performanti permettono una gestione ottimale dei dati raccolti durante le prove e un'elaborazione nel minore tempo possibile. Il vantaggio di questa considerazione lo si visualizza durante indagini sperimentali che necessitano di molte prove.

Dopo aver riassunto gli strumenti fondamentali per la realizzazione delle indagini termografiche non resta che entrare nel dettaglio di quelli utilizzati per le analisi di questa tesi. Il macchinario presente presso il Politecnico di Torino è realizzato dalla *DES (Diagnostic Engineering Solutions)*. Nell'immagine successiva presente in [10] è raffigurata in maniera schematica la strumentazione fornita.



Figura 3.2: strumentazione presente in laboratorio

Gli strumenti non vengono forniti separatamente, ma sono assemblati su una struttura con delle protezioni per lavorare in completa sicurezza. Il modello 3D della struttura è rappresentato in [10].



Figura 3.3: modello 3D della struttura del macchinario



Il macchinario utilizzato per le indagini sperimentale in questa tesi è illustrato nell'immagine 3.4.

Figura 3.4: macchinario presente in laboratorio

Dopo aver descritto gli strumenti presenti in laboratorio si procede con l'analisi dettagliata di ognuno di essi. In queso modo sarà possibile valutare le loro potenzialità e capire come saranno utilizzati nelle indagini. Si trascura la descrizione dell'unità di controllo in quanto non risulta un componente su cui agire per la realizzazione delle indagini termografiche.

3.1 La termocamera

La termocamera fornita con la strumentazione è una $FLIR \ A6751sc$ con una risoluzione di 640x512 pixel campionati ad una frequenza di 125 Hz. L'immagine fornita con il manuale [10] la raffigura senza la presenza dei supporti, che sono necessari per il serraggio in una determinata posizione.



Figura 3.5: termocamera Flir

La strumentazione presente nel laboratorio permette l'esecuzione delle indagini attraverso due modalità. La prima comporta l'utilizzo della termocamera e del raggio laser disposti adiacentemente e frontali al campione attuando una logica di *riflessione*. Il posizionamento secondo questa configurazione è presente in [10] ed è rappresentato successivamente.



Figura 3.6: modalità di riflessione

La seconda modalità di indagine sfrutta un posizionamento contrapposto del laser e della termocamera mettendo in atto una logica di *trasmissione*. Rispetto alla precedente modalità, la telecamera acquisirà le informazioni nella parte posteriore del campione che non risulta esposta al raggio laser. In [10] è raffigurata

un'immagine della disposizione degli strumenti per la realizzazione della prova con questa modalità.



Figura 3.7: modalità di trasmissione

La gestione della termocamera durante le prove avviene attraverso il software ResearchIR di proprietà della FLIR. L'interfaccia ResearchIR permette una gestione ottimale della telecamera attraverso la scelta di diverse impostazioni di funzionamento. Le possibilità riguardano molteplici parametri, ma i più importanti sono: la finestra di temperatura, la risoluzione della telecamera e il frame rate di acquisizione delle immagini. Il primo parametro riguarda il range di temperatura che si può acquisire con la telecamera e dipenderà da diversi fattori come la tipologia di materiale in esame, la quantità di calore generata dal laser e la temperatura dell'ambiente in cui si esegue l'esperimento. La sua definizione sarà vista come un parametro da adottare nel caso in cui si voglia lavorare con una determinata finestra di temperatura, oppure come un parametro da adeguare in base alle altre caratteristiche imposte durante la prova. La risoluzione della telecamera è un'impostazione che influenza il numero di pixel da utilizzare per descrivere l'immagine del campione. La scelta della risoluzione dell'immagine si ripercuote anche su un altro parametro: il frame rate. Infatti una risoluzione delle immagini più bassa permette di aumentare notevolmente il frame rate di acquisizione delle immagini. Questo però avviene a discapito del numero di pixel che si può acquisire arrivando a ridurre notevolmente l'immagine rilevabile dalla termocamera. La finestra presente in ResearchIR che permette di correlare tutti questi parametri è indicata nell'immagine successiva.

Camera Too	ıls Help			
	Setup Sync Lockin			
	Cal / Int Time (ms)		Frame Rate (Hz)	Superframing
Status	-20.0 - 55.0		125.57	Max: 343.52
.57	O 10.0 - 90.0	•	785.67	🗸 Max: 785.67
۲	80.0 - 200.0	•	125.57	Max: 1063.47
Setup	150.0 - 350.0	-	125.57	Max: 1063.47
	Reduce Noise (decreases max	(frai	me rate)	
4 8	Image Size:	160	× 128	ок 🗲 🛝
Correction	Svnc Source:		External	Video
	Enable High Sensitivity Mode			
Video				

Figura 3.8: finestra di ResearchIR del frame rate in funzione della finestra di risoluzione e della finestra di temperatura

Un grande vantaggio che deriva dall'impiego del software *ResearchIR* consiste nella possibilità di visualizzare la prova che è stata effettuata. Utilizzando dei raggi laser bisogna lavorare in completa sicurezza e, in laboratorio, questo si attua con delle barriere che racchiudono tutta la strumentazione non rendendo possibile il monitoraggio delle prove. Il software, quindi, permette di visualizzare il termogramma acquisito durante l'esperimento e stabilire il corretto posizionamento del laser e della termocamera.

La prima operazione per una corretta esecuzione delle prove consiste nella definizione di alcuni parametri presenti in *ResearchIR*. In particolare sono richiesti l'emissività del materiale in esame, la distanza tra le parti, la temperatura e l'umidità dell'ambiente dove si sta eseguendo la prova. Al termine del settaggio dei parametri sarà possibile eseguire le acquisizioni nel modo corretto. La finestra di *ResearchIR* relativa all'inserimento di questi parametri è rappresentata nella figura seguente.

Object Parameters 📃 🗖						
Override Camera/File						
Object						
Emissivity (0 to 1):	0.95					
Distance (m):	0.520					
Reflected Temp (°C):	20.0					
Atmosphere						
Atmospheric Temp (°C):	19.0					
Relative Humidity (%):	33.0					
Transmission (0 to 1):	0.98					
External Optics						
Temperature (°C):	20.0					
Transmission (0 to 1):	1.00					

Figura 3.9: finestra di ResearchIR per i parametri necessari a definire la prova

Un altro vantaggio nell'utilizzo di *ResearchIR* deriva dal poter effettuare delle analisi preliminari sulle acquisizioni. Una delle maggiori problematiche che si presenta durante le prove consiste nella saturazione delle immagini. Nell'ambito termografico, per saturazione delle immagini acquisite, si intende la rilevazione di temperature che sono al di fuori dei limiti della finestra di temperatura definita per l'esecuzione della prova. La scelta della finestra di temperatura è un parametro di non facile identificazione soprattutto nel caso di riscaldamenti notevoli sul campione. Questo comporterà, eventualmente, l'analisi di più condizioni per identificare quella maggiormente farevole ai fini della prova da svolgere. Un esempio di analisi del termogramma utilizzando *ResearchIR* è rappresentato nella successiva immagine.



Figura 3.10: schermata di analisi del termogramma mediante ResearchIR

Questo passaggio evita un processamento errato dei dati e la definizione di conclusioni non attendibili sulle indagini che si stanno svolgendo. L'andamento di temperatura della prova si ottiene anche attraverso il software di elaborazione dei dati, ma l'analisi della non saturazione della prova risulta meno veloce rispetto a quella del software *ResearchIR*. Il motivo risiede nel dovere elaborare il termogramma sul software e poi individuare un punto dove eventualmente sia presente questa problematica. Inoltre l'andamento temporale appena acquisito dalla termocamera può essere salvato per realizzare ulteriori analisi. Così facendo si possono effettuare dei confronti sulla qualità dei dati forniti da software diversi. La telecamera rappresenta il fulcro di tutta la strumentazione per la sua capacità di rilevare la temperatura del corpo. La storia temporale della temperatura sarà alla base di tutte le indagini termografiche e la modalità con cui viene rilevata andrà ad influenzare i risultati delle analisi che si stanno svolgendo.

3.2 La sorgente di calore

La sorgente di calore presente nell'apparecchiatura in dotazione è un raggio laser. Grazie al riscaldamento del componente diventa possibile effettuare le analisi di termografia *attiva*. Un esempio della testa laser presente nella strumentazione in laboratorio si trova in [10] ed è rappresentata successivamente.



Figura 3.11: esempio di testa laser fornita con la strumentazione

La gestione del raggio laser in laboratorio avviene con l'interfaccia *Multides* realizzata dalla DES. Il laser in dotazione realizza dei profili di riscaldamento assimilabili ad un'onda quadra. Questa tipologia d'onda, come accennato nel capito dello *stato dell'arte*, permette delle migliori analisi a livello di frequenze investigate. Alcuni parametri che caratterizzano l'eccitazione termica generata con l'interfaccia *Multides* sono:

- il periodo dell'impulso: che definisce il periodo dell'onda quadra responsabile del riscaldamento.
- il numero degli impulsi: rappresenta il numero di ripetizioni per effettuare dei riscaldamenti multipli.
- la percentuale di potenza: definisce la quantità di potenza da impiegare con il laser.

L'interfaccia *Multides* per l'inserimento dei valori e per il controllo del raggio laser è rappresentata nell'immagine successiva.

MultiDES R3.4.4 File View Operate Help		-		×
	System Settings Hardware Settings Channel Settings Output Settings Input Settings L	-H Settings	-	-
	MDCSBox MDCSBox ID 1000 0001 SET			~
Output	Ethernet Control Port Data Port MDCSBox IP 30301 30302 169.254.1.1			
Save Config	CSV File			
Load Coning	SAVE			
Reset Hardware Reset	MultiFile 0 Into Into Into Into Into Into Into Into			
Ð	End Stimulus Delay [ms]			
Diagnostic Engineering Solutions S.r.L.				
Microlaben s.r.L.				

Figura 3.12: schermata di interfaccia Multides per il controllo del raggio laser

Le operazioni necessarie per il settaggio del laser sono principalmente due. La prima riguarda il posizionamento del raggio nel punto d'interesse sul campione. La realizzazione del posizionamento avviene con un'apposita sezione dell'interfaccia *Multides* definita *Head Setup*. Attraverso questa sezione si movimenta la testa laser lungo le coordinate x-y con la possibilità di variare il passo di spostamento in modo da raggiungere la posizione voluta con la maggiore facilità e precisione possibile. La schermata *Multides* per il posizionamento del raggio è rappresentata di seguito.



Figura 3.13: schermata di interfaccia Multides per il posizionamento della testa laser

La seconda operazione da eseguire consiste nell'inserimento delle informazioni inerenti la potenza da generare con la sorgente dell'eccitazione. Questi parametri saranno dipendenti dalle prove da realizzare. Alcuni esempi su *Multides* delle possibili applicazioni sono indicati in figura 3.14.



(a) esempio di eccitazione termica per una prova impulsiva



(b) esempio di eccitazione termica per una prova con impulsi multipli

Figura 3.14: interfaccia Multides per la definizione delle eccitazioni termiche

Dopo la definizione dei parametri appena descritti si procede con l'isolamento di tutti gli apparati dal laboratorio mediante una tenda normata per applicazioni che impiegano sorgenti laser. L'utilizzo in sicurezza della strumentazione avviene attraverso delle opportune procedure che precedono la generazione del raggio laser. Solo a questo punto sarà possibile realizzare la prova e acquisire le informazioni attraverso la telecamera.

3.3 Il software per l'analisi del termogramma

L'ultima parte della strumentazione da analizzare, ma non la meno importante, è il software di processamento dei dati. Il passo successivo all'acquisizione del termogramma consiste nella sua elaborazione per ricavare tutte le informazioni utili alle analisi. Il software presente in laboratorio che si occupa di realizzare quanto appena descritto si chiama *Irta* ed è realizzato dalla DES. Al suo interno sono presenti differenti *tool* per l'esecuzione di diverse analisi oppure per ricavare dati necessari ad effettuarle. L'interfaccia del software *Irta* al termine dell'importazione del termogramma da analizzare si presenta come nell'immagine seguente.



Figura 3.15: interfaccia del software Irta

Il passo successivo dipenderà dalle analisi che sono necessarie. Un tool molto importante, impiegato soprattutto nelle fasi iniziali dell'elaborazione del termogramma, è la realizzazione dello *Spot Track*. Lo *Spot Track* è uno strumento in grado di rappresentare l'andamento temporale della temperatura generato da un pixel durante la prova. Il software *Irta* restituisce i diversi andamenti di temperatura nella parte bassa dell'interfaccia con l'utente. I pixel d'interesse sono inseriti attraverso le informazioni delle coordinate x e y in un'apposita sezione dello Spot. Un'analisi preliminare dei punti di maggiore interesse avviene basandosi sull'immagine del termogramma. Un esempio dei possibili andamenti su Irta è rappresentato in figura 3.16.



Figura 3.16: andamenti dello Spot Track per differenti pixel del termogramma realizzati con Irta

Questo strumento trova soprattutto impiego in questa tesi per analisi che riguardano la ricerca del pixel dove si raggiunge il massimo di temperatura durante la prova oppure per ricavare gli andamenti nel tempo della temperatura. Inoltre, in una parte laterale dell'interfaccia definita *Signal Information* si mettono in evidenza alcune informazioni nel dominio della frequenza relative al pixel selezionato per l'analisi. Tutte queste informazioni si possono esportare all'esterno del software mediante dei file Excel. Così facendo si riescono ulteriormente ad elaborare per trarre altre conclusioni sui dati ricavati attraverso le prove sperimentali.

Un altro tool molto importante all'interno del software *Irta* è *l'analisi Lock-in*. L'algoritmo implementato permette di ricavare le immagini di *ampiezza* e di *fase* fino a tre frequenze contemporaneamente. Oltre al valore della frequenza alla quale estrarre i valori vengono richiesti anche i frame sui quali applicare l'algoritmo. La logica consiste nell'individuare, mediante l'evoluzione del termogramma, il frame che precede il bagliore del raggio laser e il frame nel quale il termogramma risulta stabilizzato. Così facendo si evita il processamento di frame senza informazioni interessanti ma che comporterebbero soltanto un dispiendio di memoria. La schermata di interfaccia su *Irta* per la definizione dei parametri necessari è rappresentata nell'immagine successiva.

	Frequency/Period	Alle	Signal Fr	equency (HZ)	Signal Period (s)
	riequency (H2)	J0	0		50
	Frequency (Hz)	0	0		0
	Frequency (Hz)	/) T/ 0	0		
equence f C:\Users'	le (luca\Documents\P(DLITECNICO\T	Fermografia\Provinc	_saldatura_acc	iaio-DP600\21-
equence f C:\Users' mplitude	le \luca\Documents\P(file (filename root)	DLITECNICO\T	Fermografia\Provinc	_saldatura_acc	iaio-DP600\21-
equence f C:\Users' mplitude	le \luca\Documents\P(file (filename root)	DLITECNICO\T	Termografia\Provinc	_saldatura_acc	iaio-DP600\21-
quence f C:\Users' nplitude ase file (le Juca\Documents\P(file (filename root) filename root)	DLITECNICO\1	Termografia\Provinc	_saldatura_acc	iaio-DP600\21-

Figura 3.17: schermata di interfaccia del software Irta per l'analisi Lock-in

Al termine dell'analisi verranno fornite le immagini di ampiezza e di fase della prova in esame alla frequenza ritenuta d'interesse per le analisi.

Per ricavare delle informazioni sotto un aspetto numerico più dettagliato si utilizza un tool in grado di elaborare le immagini ottenute dalle precedenti analisi. I risultati d'interesse, dal punto di vista numerico, si identificano con il nome di *ROI (Results Of Interest)*. Il tool che si occupa di recuperarli dalle immagini è il *ROI extraction*. Definendo un griglia oppure il singolo pixel si ottiene un file Excel contenente i dati numerici relativi all'immagine dell'analisi. Questo strumento è molto importante perchè genera risultati più dettagliati a livello quantitativo e meno a livello qualitativo, trattandosi di dati numerici e non di immagini.

Quindi, il software *Irta* risulta un possibile strumento adatto per realizzare alcune analisi partendo dal termogramma acquisito con la termocamera. Le analisi che si effettuano generano direttamente dei risultati finali oppure servono per reperire dati necessari ad altre elaborazioni. L'unione di *Irta* insieme ad altri software, come ad esempio *Matlab*, rappresenta una logica molto versatile in campo termografico per l'esecuzione di una corretta analisi dei dati.

Capitolo 4 Analisi sperimentale

In questo capitolo si metteranno in evidenza i risultati raggiunti con lo studio di questa tesi. L'obiettivo consiste nel realizzare una caratterizzazione dei materiali attraverso le tecniche di termografia *attiva*. L'analisi sperimentale si attua solamente dopo uno studio approfondito dello *stato dell'arte* relativo alla letteratura della termografia *attiva* e dopo aver preso dimestichezza con la *strumentazione* presente in laboratorio. Dall'analisi dello *stato dell'arte* si mette in risalto come il lavoro presente nella letteratura generi delle considerazioni molto qualitative e poco quantitative. Infatti, un approccio di analisi attraverso le sole immagini dell'ampiezza e della fase rimane uno studio molto qualitativo. Lo scopo di questa tesi consiste nel definire, attraverso la termografia attiva, una logica di analisi dei materiali che sia più *quantitativa* per poterli caratterizzare e descrivere. I dati ottenuti attraverso le prove sperimentali sono trattati con i software *Irta*, *ResearchIR* e *Matlab*.

L'analisi sperimentale ha seguito un *iter* ben definito replicandolo con diverse ipotesi fino all'ottenimento di risultati interessanti. L'identificazione di una logica di analisi *ottimale* non è stata immediata in quanto non è presente nessuna linea guida in letteratura. La sua validazione avviene al termine di tutti i passaggi necessari per ottenere i risultati, che saranno dipendenti dalla possibile logica di analisi messa in atto. Infatti solamente attraverso l'analisi dei risultati ottenuti si stabilirà se la strada intrapresa può essere corretta oppure no. I passaggi che hanno caratterizzato l'analisi sperimentale sono rappresentati attraverso il flow chart dell'immagine 4.1.



Figura 4.1: flow chart dell'iter utilizzato per l'analisi sperimentale

Ogni macro fase rappresentata in figura 4.1 assume un ruolo ben definito all'interno dell'analisi sperimentale.

L'identificazione della logica di analisi risulta la parte più complicata di tutto l'approccio sperimentale ed è stata ottenuta effettuando numerose prove. In questa fase bisogna individuare una logica per affrontare il problema, che nel dettaglio di questa tesi è la caratterizzazione dei materiali attraverso la termografia *attiva*. Prendendo spunto da quanto ottenuto fino ad ora in letteratura si sono intraprese diverse logiche di analisi fino all'ottenimento dei risultati più interessanti. L'identificazione di una possibile logica di analisi comprende sia la definizione della griglia di prove contenente i parametri per attuarla ma anche eventuali elaborazioni per ottenere i risultati da validare.

L'esecuzione delle prove sperimentali è il passo immediatamente successivo alla definizione di una possibile logica di analisi. Questa parte dell'approccio sperimentale segue un'altra procedura ben definita. I passaggi per la realizzazione delle prove sperimentali sono evidenziati nell'immagine successiva richiamando gli strumenti descritti nel capitolo della strumentazione. L'obiettivo sarà quello





Figura 4.2: flow chart dell'approccio utilizzato per le prove sperimentali

Al termine delle prove sperimentali si procede con il *processamento* dei termogrammi in modo da estrarre le informazioni necessarie alle successive *elaborazioni* per l'ottenimento dei risultati da analizzare. Gli strumenti che si occupano di trattare il termogramma sono il software *Irta* e *ResearchIR*. La loro potenzialità deriva dalla capacità di elaborare i termogrammi e dalla possibilità di ricavare i dati in maniera numerica. Così facendo diventa possibile analizzare se i risultati ottenuti dalla logica intrapresa sono interessanti oppure no. Un altro valido aiuto in questa fase deriva anche dal software *Matlab* utilizzato principalmente per elaborare gli andamenti ricavati con i termogrammi ed effettuare ulteriori considerazioni.

I campioni utilizzati per lo studio della caratterizzazione dei materiali sono un provino in *acciaio DP600* e un provino in materiale *ceramico* Si_3N_4 . I valori di emissività utilizzati sono di 0,95 nel caso dell'acciaio e di 0,90 nel caso del materiale ceramico. Le immagini dei provini in esame sono rappresentate di seguito.



Figura 4.3: provino in acciaio DP600 utilizzato per la caratterizzazione dei materiali



Figura 4.4: provino ceramico Si_3N_4 utilizzato per la caratterizzazione dei materiali

Nelle sezioni successive verranno presentate le logiche di analisi e i risultati ricavati dalle elaborazioni delle prove sperimentali. L'unione delle logiche di analisi con i risultati ottenuti sarà utile ai fini della caratterizzazione dei materiali utilizzando degli approcci di termografia *attiva*.

4.1 Logiche di analisi del problema

Ogni ipotesi di *logica di analisi del problema* è stata affrontata con il seguente approccio.



Figura 4.5: passaggi per l'ottenimento dei risultati

La validazione dei risultati avviene solamente dopo aver processato ed elaborato i termogrammi realizzati con un'opportuna griglia di prove. I termogrammi e le eventuali elaborazioni, però, saranno dipendenti dalla possibile logica di analisi che è stata messa in atto. L'attuazione di questa procedura permette di ottimizzare e velocizzare lo studio per la definizione della logica di analisi in grado di generare i risultati più interessanti.

Il primo approccio al problema della caratterizzazione dei materiali prende in considerazione una logica di indagine basata sul massimizzare tutte le potenzialità dell'analisi *Lock-in*. Come affrontato nel capitolo dello *stato dell'arte*, la tecnica *Lock-in* sfrutta eccitazioni periodiche tali da realizzare uno studio nel campo stazionario utilizzando le immagini di ampiezza e di fase come strumento principale per effettuare le indagini. La ricerca di considerazioni più quantitative si basa sullo studio dei valori numerici dei pixel che compongono le immagini della fase e dell'ampiezza. L'approccio appena descritto è stato attuato partendo dal provino in acciaio DP600. La griglia di prove è stata messa a punto cercando di prevedere l'utilizzo di parametri in grado di generare un andamento periodico dell'eccitazione ma senza creare un eccessivo surriscaldamento nel campione. Questa considerazione risulta molto importante per poter applicare successivamente la stessa griglia di prove anche al provino ceramico in modo da confrontare i loro comportamenti a parità di parametri della prova. I parametri delle prove sperimentali sono rappresentati nella successiva tabella.

Analisi	sperimental e
---------	---------------

Periodo	Laser	N°impulsi	Fin. temperatura	Fin. risoluzione	Frame rate
[ms]	[%]	—	$[^{\circ}C]$	[pixel]	[Hz]
300	25	3	-20 - 55	640x512	125,57
300	30	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
300	35	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
450	25	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
450	30	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
450	35	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
600	25	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
600	30	3	-20 - 55	640 x 512	$125,\!57$
600	35	3	-20 - 55	640x512	$125,\!57$

Tabella 4.1: griglia di prove attuata con la prima logica di analisi

La griglia di prove rappresentata in tabella 4.1 genera problematiche di saturazione nella finestra di temperatura fissata. Le prove maggiormente colpite sono quelle con un elevato valore di periodo o potenza del laser, rendendo il termogramma inutilizzabile. L'attenzione, quindi, si è focalizzata sulle prove che non hanno generato questa problematica. Il processamento dei dati acquisiti con il termogramma avviene con il software *Irta* impiegandolo anche per successive elaborazioni. Infatti il passo seguente consiste nell'analizzare in maniera quantitativa le immagini dell'ampiezza e della fase ricavate per il valore di frequenza dell'eccitazione della prova in esame. Un esempio delle immagini di fase e di ampiezza per il Test 1 generate con il software *Irta* alla frequenza di eccitazione pari a 3,3 Hz è rappresentato nelle successive immagini.



Figura 4.6: schermata di Irta dell'immagine dell'ampiezza ricavata con l'analisi Lock-in



Figura 4.7: schermata di Irta dell'immagine della fase ricavata con l'analisi Lock-in

L'analisi quantitativa dei valori avviene con dei grafici 3D realizzati da un tool di *Irta*. Il grafico rappresenta i valori numerici delle immagini della fase e dell'ampiezza in ogni pixel. Utilizzando questo approccio non si ottengono risultati d'interesse in quanto viene evidenziata solamente la presenza del massimo dell'ampiezza nell'intorno della zona dove si effettua il puntamento del raggio laser.



Figura 4.8: esempio di grafico 3D su Irta per analizzare i valori di ampiezza dell'analisi Lock-in

Una seconda logica di analisi presa in considerazione ha posto l'attenzione sulla definizione di una griglia di prove tale da non generare delle saturazioni durante le prove. Si procede modificando la finestra di temperatura della precedente griglia

Periodo	Laser	N°impulsi	Fin. temperatura	Fin. risoluzione	Frame rate
[ms]	[%]	—	$[^{\circ}C]$	[pixel]	[Hz]
300	25	3	10 - 90	640 x 512	125,57
300	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
300	35	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	25	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	35	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
600	25	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
600	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
600	35	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$

di prove portandola a valori di 10 - 90°C. La tabella contenente i nuovi parametri delle prove è:

Tabella 4.2: griglia di prove attuata per ridurre le saturazioni delle immagini

e utilizzando i parametri rappresentati in 4.2 si ricavano dei termogrammi non saturati per una buona parte delle prove, ma non ancora per tutte le condizioni. Il processamento del termogramma avviene in modo analogo a quello descritto nella precedente logica di analisi come anche le elaborazioni dei risultati. La nuova logica messa in atto non ha evidenziato informazioni utili a livello quantitativo.

L'attenzione, a questo punto, si è focalizzata sul modificare ulteriormente le finestre di temperatura delle prove ancora da acquisire in modo da mantenere come obiettivo l'ottenimento di tutti i termogrammi dalla griglia di prove definita in partenza. La griglia di prove che ha permesso un'acquisizione completa di tutti i termogrammi è rappresentata nella tabella successiva.

Periodo	Laser	N°impulsi	Fin. temperatura	Fin. risoluzione	Frame rate
[ms]	[%]	—	$[^{\circ}C]$	[pixel]	[Hz]
300	25	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
300	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
300	35	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	25	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
450	35	3	80 - 200	640 x 512	$125,\!57$
600	25	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
600	30	3	10 - 90	640 x 512	$125,\!57$
600	35	3	80 - 200	640 x 512	$125,\!57$

Tabella 4.3: griglia di prove attuata per evitare le saturazioni delle immagini

Attraverso la griglia di prove presente in tabella 4.3 è stato possibile acquisire tutti i termogrammi senza saturazioni e processare i dati ottenuti per ogni condizione della griglia. L'analisi quantitativa, questa volta, ha preso in considerazione solamente il pixel che raggiunge il massimo di temperatura durante la prova. L'analisi Lock-in dei termogrammi, però, avviene in maniera identica alle precedenti logiche di analisi estraendo i valori alle frequenze dell'eccitazione termica. L'identificazione dei valori numerici nel pixel in esame si realizza attraverso il comando *ROI extraction*. I risultati raggiunti, anche in questo caso, non hanno messo in evidenza aspetti interessanti.

La nuova logica di analisi del problema ha spostato completamente l'attenzione dalla griglia di prove visti gli scarsi risultati ottenuti con l'elaborazione di tutti i termogrammi. L'attenzione si è concentrata sulle frequenze da utilizzare nell'analisi Lock-in. Attraverso il tool Signal Information, presente nel software Irta, si mettono in evidenza alcuni risultati nel dominio della frequenza. In particolare vengono rappresentati lo spettro dell'ampiezza e della fase ottenuti attraverso la trasformata di Fourier dell'andamento nel tempo della temperatura. Le informazioni ricavate con il Signal Information sono riferite ad un determinato pixel scelto per le indagini, che rimane quello dove si verifica il massimo di temperatura durante la prova identificato con lo Spot Track. La nuova logica di studio del problema prende in considerazione un'analisi numerica delle immagini dell'ampiezza e della fase per diversi valori di frequenze che si basano sul dominio della frequenza investigato attraverso le trasformate di Fourier di Irta. I valori numerici in corrispondenza del pixel del massimo di temperatura sono estratti attraverso la funzione ROI Extraction. Inizialmente sono state generate analisi Lock-in per passi ampi di frequenza in modo da ricavare un andamento globale e poi successivamente si è provveduto ad infittire nell'intorno delle frequenze dove si realizzano i valori maggiori dell'ampiezza oppure dove si generano dei cambiamenti nella fase. In base alla strada intrapresa si sono adeguati i corrispondenti valori di ampiezza o di fase nelle frequenze di infittimento. Così facendo si realizza anche un confronto tra i valori dell'ampiezza e della fase per individuare una loro correlazione sulla base dello stesso dominio delle frequenze. Questi approcci, però, non hanno portato a nessun risultato interessante a livello di caratterizzazione del materiale. Nell'immagine successiva si rappresentano i risultati ottenuti su Irta per la prima prova definita secondo le condizioni presenti in tabella 4.3. I risultati riguardano la logica basata sulla ricerca delle informazioni nell'intorno del massimo valore dell'ampiezza adeguando i corrispondenti valori della fase.



Figura 4.9: informazioni su Irta relative alla prova in esame

E rappresentando i risultati ricavati con le *ROI extraction* dalle analisi *Lock-in* per determinate frequenze di indagine si ottengono i seguenti spettri.



Figura 4.10: andamenti dell'ampiezza ricavati con il tool ROI Extraction dalle analisi Lock-in



Figura 4.11: andamenti della fase ricavati con il tool ROI Extraction dalle analisi Lock-in

E' possibile notare come il picco dell'ampiezza sia in corrispondenza di una frequenza di 3,3 Hz corrispondente al valore dell'eccitazione termica realizzata con il laser.

Il nuovo approccio intraprende una logica di analisi molto simile a quella attuata nello studio delle vibrazioni in ambito meccanico. L'utilizzo di parametri come l'ampiezza e la fase, ricavati attraverso un'analisi nel dominio della frequenza, comporta molti vantaggi e semplificazioni durante le indagini. La caratterizzazione dei parametri relativi al comportamento dinamico di un sistema meccanico avviene attraverso l'analisi della risposta libera. Un modo per realizzare la risposta libera di un sistema consiste nell'applicazione di forzanti impulsive in quanto l'applicazione di forzanti periodiche prende importanza nello studio dinamico quando si necessita di conoscere la risposta forzata del sistema. La successiva logica di analisi considererà una forzate termica impulsiva e non periodica in modo tale da portare le ipotesi precedenti al campo applicativo di questa tesi. La tecnica di termografia *attiva* che attua un approccio molto simile a quello appena definito è la logica Pulsed. L'andamento di temperatura nel dominio delle frequenza permetterà di attuare un'analisi che continua ad utilizzare le grandezze dell'ampiezza e della fase, ma questa volta relative alla risposta termica libera del sistema che si sta studiando. Il passaggio dal dominio del tempo a quello della frequenza avviene utilizzando la trasformata di Fourier attuando la variante Pulsed Phase Thermography. Questa nuova logica necessita di mettere a punto una griglia di prove caratterizzata da test con un singolo impulso e inoltre bisogna modificare anche il parametro del frame rate. Il motivo deriva dalla notevole quantità di frequenze eccitate utilizzando un'onda quadra impulsiva molto corta come periodo e alta in termini di percentuale del laser. Utilizzando il frame rate delle precedenti logiche di analisi si rischia di applicare un filtro alle frequenze che sono di valore superiore con la conseguente perdita di eventuali contributi interessanti. L'aumento del frame rate avviene agendo sul software *ResearchIR* dove però sarà necessaria una diminuzione della finestra di risoluzione della termocamera. Nella tabella successiva si mettono in evidenza i parametri che descrivono la nuova griglia di prove applicata sia sul provino in acciaio DP600 che sul provino in materiale ceramico Si_3N_4 .

Periodo	Laser	N°impulsi	Fin. temperatura	Fin. risoluzione	Frame rate
[ms]	[%]	_	$[^{\circ}C]$	[pixel]	[Hz]
50	100	1	10 - 90	160x128	785,67
55	95	1	10 - 90	160 x 128	$785,\!67$
60	90	1	10 - 90	160 x 128	$785,\!67$
65	85	1	10 - 90	160x128	$785,\!67$
70	80	1	10 - 90	160x128	$785,\!67$
75	75	1	10 - 90	160x128	$785,\!67$
80	70	1	10 - 90	160x128	$785,\!67$
85	65	1	10 - 90	160x128	$785,\!67$
90	60	1	10 - 90	160x128	785,67

Tabella 4.4: griglia di prove impulsiva

Non è stato possibile intraprendere la logica di analisi perchè le acquisizioni non sono attendibili. I termogrammi rilevati dalla termocamera presentano tutti delle saturazioni per la presenza dei valori elevati di potenza del laser.

La nuova griglia di prove in grado di evitare le saturazioni è stata messa a punto dal gruppo di ricerca. I parametri seguono l'ultima logica di analisi messa in atto e si basano su precedenti esperienze nell'ambito di prove svolte con la termografia di tipo *Pulsed*. I risultati ottenuti, impiegando questa gliglia di prove, hanno messo in evidenza considerazioni utili per la caratterizzazione dei materiali. L'analisi dei risultati ricavati attraverso le differenti logiche di analisi è stata fondamentale per valutare la possibile correttezza della strada intrapresa e l'idoneità degli strumenti utilizzati.

Nella sezione successiva verranno evidenziati tutti i risultati relativi alla caratterizzazione dei materiali mediante la logica di analisi appena descritta.

4.2 Analisi nel dominio della frequenza

La logica di analisi intrapresa per la caratterizzazione dei materiali si basa sullo studio di come un sistema risponde sotto l'azione di forze impulsive. Entrando nel dettaglio di questa tesi lo scopo sarà quello di studiare le risposte termiche generate attraverso delle eccitazioni termiche impulsive. I parametri utilizzati durante le prove sono in grado di generare differenti comportamenti impulsivi in modo tale da analizzare le diverse risposte termiche dei materiali. La griglia di prove utilizzata è schematizzata in figura 4.12.



Figura 4.12: variazione dei parametri della griglia di prove

Nelle successive figure sono rappresentati i provini montati sulla strumenta-zione.



Figura 4.13: provino in acciaio DP600 durante gli esperimenti



Figura 4.14: provino ceramico Si_3N_4 durante gli esperimenti

Dopo la calibrazione dei parametri caratteristici della prova nell'ambiente ResearchIR, descritti nel capitolo della strumentazione, si procede con l'acquisizione dei termogrammi effettuando le prove sperimentali. Una volta verificata la corretta acquisizione delle prove si passa all'elaborazione dei dati rilevati. Le analisi interessano il pixel dove si raggiunge il massimo di temperatura durante la prova. Con il software Irta si esegue una prima analisi del termogramma per individuare in maniera agevole il pixel d'interesse per l'analisi. L'identificazione delle sue coordinate avviene attraverso la funzione Spot track. Il punto di partenza consiste nell'analizzare un pixel nella zona del puntamento del laser e successivamente si prosegue con una procedura iterativa valutando i valori dei pixel circostanti fino ad individuare quello ricercato. Il passo seguente consiste nell'estrazione del suo andamento di temperatura nel tempo in modo da attuare tutte le indagini necessarie. L'informazione si estrae con un file Excel direttamente da Irta oppure da ResearchIR. La seconda possibilità permette un'elaborazione del file Excel molto più veloce in modo da ottimizzarlo per successivi processamenti nell'ambiente di calcolo Matlab.

La necessità di analizzare l'andamento di temperatura nel tempo attraverso *Matlab* nasce per ricavare le analisi in frequenza della sola fase di raffreddamento, visto che rappresenta la corrispondente risposta libera del sistema. Il software *Irta* realizza uno studio nel dominio delle frequenze applicato a tutto l'andamento della prova. Un esempio dell'andamento di temperatura nel tempo realizzato con Irta per il Test 1 dell'acciaio DP600 è rappresentato nella successiva figura.



Figura 4.15: andamento nel tempo generato dal software Irta per il Test 1

Da cui è possibile evidenziare tre tratti principali:

- il primo tratto che precede l'eccitazione termica ed è composto solamente da rumore.
- il secondo tratto descrive un rapido aumento di temperatura sul campione causato dal riscaldamento del raggio laser.
- l'ultimo tratto descrive la fase di raffreddamento corrispondente alla risposta libera del sistema a seguito della rimozione dell'eccitazione termica.

La scrittura di un codice *Matlab* permette un processamento dei dati più approfondito effettuando:

- la rimozione del primo tratto per ottenere una misura il più possibile precisa.
- la separazione della fase di riscaldamento da quella di raffreddamento.
- la realizzazione della trasformata di Fourier della fase d'interesse.

La verifica di una corretta elaborazione ed importazione dell'andamento di temperatura nel tempo sul *Matlab* avviene attraverso una sua rappresentazione in quest'ultimo ambiente. Facendo riferimento allo *Spot* rappresentato in figura 4.15, il corrispondente andamento realizzato mediante il codice *Matlab* risulta:



Figura 4.16: andamento nel tempo ricreato con il codice Matlab

Mentre tutti gli andamenti per le prove dell'acciaio DP600 e del ceramico sono:


Figura 4.17: andamenti nel tempo ricreati con il codice Matlab del provino in acciaio DP600



Figura 4.18: andamenti nel tempo ricreati con il codice Matlab del provino ceramico

A questo punto si procede con la rimozione del tratto iniziale e l'identificazione della sola fase di raffreddamento. Dettagliando il Test 1 per l'acciaio DP600:



Figura 4.19: andamento nel tempo ricreato con il codice Matlab senza il tratto iniziale



Figura 4.20: andamento nel tempo ricreato con il codice Matlab della fase di raffreddamento

Valutando gli andamenti di tutte le prove:



Figura 4.21: andamenti nel tempo senza il tratto iniziale ricreati con il codice Matlab del provino in acciaio DP600



Figura 4.22: andamenti nel tempo della fase di raffreddamento ricreati con il codice Matlab del provino in acciaio DP600

Mentre quelli relativi al materiale ceramico sono:



Figura 4.23: andamenti nel tempo senza il tratto iniziale ricreati con il codice Matlab del provino ceramico



Figura 4.24: andamenti nel tempo della fase di raffreddamento ricreati con il codice Matlab del provino ceramico

Il passaggio successivo alla definizione degli andamenti nel dominio del tempo consiste nello studio della risposta libera del sistema con un'analisi nel dominio della frequenza. L'analisi in frequenza genera uno spettro delle frequenze in grado di descrivere come i diversi contributi della grandezza in esame si ripartiscono lungo le frequenze. Così facendo si metterà in evidenza come i contributi di ampiezza siano legati al dominio della frequenza e come l'andamento della fase sia in grado di descrivere il comportamento del sistema. Questa logica di analisi è stata attuata per tutti i test della griglia di prove e per ambedue i provini in esame. I grafici che saranno illustrati successivamente sono realizzati con una scala doppio logaritmica per ottenere una migliore visibilità dei risultati. Analizzando nel dettaglio gli andamenti dell'*ampiezza* ottenuti nel caso del provino in *acciaio* DP600 si ottiene:



Figura 4.25: andamenti dell'ampiezza per le prove dell'acciaio DP600



Mentre gli andamenti della *fase* sono:

Figura 4.26: andamenti della fase per le prove dell'acciaio DP600



Per quanto riguarda le *ampiezze* del materiale *ceramico*:

Figura 4.27: andamenti dell'ampiezza per le prove del ceramico

Mentre gli andamenti della fase sono rappresentati di seguito:



Figura 4.28: andamenti della fase per le prove del ceramico

Un primo risultato si ottiene confrontando gli andamenti per i due materiali ricavati nelle differenti prove. Analizzando l'*ampiezza*:



Figura 4.29: confronto delle ampiezze tra i due materiali nelle diverse prove

E mettendo in evidenza il primo tratto del dominio della frequenza:



Figura 4.30: ingrandimento del confronto delle ampiezze tra i due materiali nelle diverse prove

Mentre per quanto riguarda la *fase*:



Figura 4.31: confronto delle fasi tra i due materiali nelle diverse prove

Di seguito si evidenzia il primo tratto del dominio della frequenza:



Figura 4.32: ingrandimento del confronto delle fasi tra i due materiali nelle diverse prove

Dopo aver identificato gli andamenti dell'ampiezza e della fase si prosegue con un'analisi in forma numerica. La strada intrapresa consiste nel confrontare i valori per determinate frequenze d'interesse a parità di condizioni della prova. Il confronto è riportato attraverso delle tabelle sia nel caso dell'acciaio DP600 che per la ceramica. Le frequenze scelte sono:

- la prima che deriva dalla discretizzazione del dominio della frequenza ottenuta mediante il codice *Matlab*, che risulta nell'intorno di 0,25 Hz. Questo valore permette di analizzare i contributi a bassa frequenza.
- quella che considera l'intersezione tra gli andamenti delle ampiezze dei due provini valutata nel dettaglio per ogni singola prova.
- quella che considera l'intersezione tra gli andamenti delle fasi dei due provini valutata nel dettaglio per ogni singola prova.
- una nell'intorno dei 10 Hz per analizzare le frequenze più alte.

Così facendo diventa possibile confrontare i valori ottenuti lungo quasi tutto il dominio della frequenza in esame.

I valori delle *frequenze* dove avvengono le intersezioni delle fasi e delle ampiezze sono riportati successivamente.

	Frequenza di	Frequenza di
Test	intersezione delle ampiezze [Hz]	intersezione delle fasi [Hz]
Test 1	3,57	0,49
Test 2	$4,\!65$	$0,\!54$
Test 3	5,1	$0,\!57$
Test 4	5,79	0,62
Test 5	$6,\!48$	$0,\!65$
Test 6	8,42	0,66
Test 7	6,44	$0,\!62$

Tabella 4.5: frequenze delle intersezioni degli andamenti di ampiezza e fase

I valori dell'ampiezza e della fase per l'acciaio DP600 alle frequenze d'interesse sono:

	Ampiezza a	Ampiezza nelle	Ampiezza nelle	Ampiezza a
Test	$0,25 \text{ Hz} [^{\circ}\text{C}]$	intersez. amp. [°C]	intersez. fasi [°C]	$10 \text{ Hz} [^{\circ}\text{C}]$
Test 1	0,8456	0,226	0,63	0,15664
Test 2	0,7814	$0,\!172$	$0,\!55$	0,12624
Test 3	0,7282	$0,\!148$	$0,\!49$	0,11266
Test 4	$0,\!633$	$0,\!118$	$0,\!4$	0,08958
Test 5	$0,\!547$	0,091	$0,\!34$	0,07448
Test 6	$0,\!431$	0,058	0,26	0,05558
Test 7	0,3386	0,054	0,22	0,04486

Tabella 4.6: valori dell'ampiezza per il provino in acciao DP600 alle frequenze d'interesse

	Fase a	Fase nelle	Fase nelle	Fase a
Test	$0,25~{\rm Hz}~[^{\circ}]$	intersez. amp. $[^{\circ}]$	intersez. fasi [°]	10 Hz [°]
Test 1	0,02222	0,024	0,0256	0,0202
Test 2	0,02308	0,0258	0,026	0,0222
Test 3	0,02356	0,025	0,0278	0,02276
Test 4	0,02398	0,027	0,029	0,02436
Test 5	0,0241	0,027	0,0296	0,02446
Test 6	0,02386	0,027	0,0298	0,02516
Test 7	0,0243	0,028	0,0298	0,02644

Tabella 4.7: valori della fase per il provino in acciao DP600 alle frequenze d'interesse

I valori dell'*ampiezza* e della *fase* per il materiale ceramico alle frequenze d'interesse sono:

	Ampiezza a	Ampiezza nelle	Ampiezza nelle	Ampiezza a
Test	$0,25 \text{ Hz} [^{\circ}\text{C}]$	intersez. amp. [°C]	intersez. fasi [°C]	$10 \text{ Hz} [^{\circ}\text{C}]$
Test 1	0,9602	0,226	0,8	0,1077
Test 2	0,9286	$0,\!172$	0,73	0,09564
Test 3	0,8608	$0,\!148$	$0,\!67$	0,0887
Test 4	0,755	$0,\!118$	$0,\!56$	0,07514
Test 5	$0,\!652$	0,091	$0,\!47$	0,06584
Test 6	0,519	0,058	$0,\!38$	0,04974
Test 7	0,407	0,054	$0,\!3$	0,03926

Tabella 4.8: valori dell'ampiezza per il provino ceramico alle frequenze d'interesse

	Fase a	Fase nelle	Fase nelle	Fase a
Test	$0,25~{\rm Hz}~[^{\circ}]$	intersez. amp. $[^{\circ}]$	intersez. fasi $[^\circ]$	10 Hz $[^{\circ}]$
Test 1	0,02156	0,04	0,0256	0,0423
Test 2	0,02246	0,042	0,026	$0,\!04322$
Test 3	0,02294	0,042	0,0278	$0,\!04376$
Test 4	0,02284	0,043	0,029	0,04452
Test 5	0,02298	0,044	0,0296	0,04448
Test 6	0,02358	0,045	0,0298	$0,\!04506$
Test 7	0,02316	0,045	0,0298	$0,\!04574$

Tabella 4.9: valori della fase per il provino ceramico alle frequenze d'interesse

L'estrazione dei valori numerici permette di analizzare nel dettaglio gli andamenti dell'ampiezza e della fase. La prima analisi che è stata effettuata prende in esame gli scostamenti degli andamenti dell'ampiezza e della fase tra i due materiali sia per le basse che per le alte frequenze a parità di parametri della prova. Così facendo si mette in evidenza il differente comportamento dei materiali attraverso la variazione numerica in termini di scostamenti analizzati come la variazione percentuale di incrementi. I risultati ottenuti per l'ampiezza e per la fase in corrispondenza della bassa e dell'alta frequenza sono rappresentati nelle due tabelle successive.

	Variaz. percentuale ampiezza	Variaz. percentuale fase
Test	a 0,25 Hz [%]	a 0,25 Hz [%]
Test 1	13,55	3,06
Test 2	18,84	2,76
Test 3	18,21	2,70
Test 4	$19,\!27$	$4,\!99$
Test 5	19,20	$4,\!87$
Test 6	20,42	$1,\!19$
Test 7	20,20	$4,\!92$

Tabella 4.10: variazioni percentuali dei risultati ottenuti alla bassa frequenza

	Variaz. percentuale ampiezza	Variaz. percentuale fase
Test	a 10 Hz [%]	a 10 Hz [%]
Test 1	$45,\!44$	109,41
Test 2	$31,\!99$	94,68
Test 3	27,01	92,27
Test 4	19,22	82,76
Test 5	$13,\!12$	81,85
Test 6	11,74	79,09
Test 7	14,26	73

Tabella 4.11: variazioni percentuali dei risultati ottenuti all'alta frequenza

Ulteriori considerazioni derivano dall'analisi di come si modificano le ampiezze e le fasi nei loro punti di intersezione in funzione dei differenti parametri delle prove. Le intersezioni analizzeranno delle particolari frequenze dove i comportamenti dei materiali sono simili in termini di ampiezza di temperatura e fase del segnale.

Test	Ampiezza [°C]	Fase [°]
Test 1	0,226	0,0256
Test 2	0,172	0,026
Test 3	$0,\!148$	0,0278
Test 4	0,118	0,029
Test 5	0,091	0,0296
Test 6	0,058	0,0298
Test 7	0,054	0,0298

Tabella 4.12: valori dell'ampiezza e della fase in corrispondenza delle intersezioni nelle diverse prove

Dai risultati ottenuti, sia graficamente che numericamente, si evidenzia come i materiali assumono comportamenti differenti lungo il dominio della frequenza. Il comportamento dei materiali, quindi, sarà dipendente sia dalle loro caratteristiche ma anche dai parametri impiegati per l'esecuzione delle prove sperimentali e dalle condizioni con cui sono state svolte.

4.3 Confronto tra i materiali

La caratterizzazione dei materiali è avvenuta attraverso la metodologia e i risultati descritti nelle sezioni precedenti. La logica utilizzata per lo studio del problema sfrutta l'analisi nel dominio della frequenza. Mediante questo approccio applicato alla *risposta libera del sistema*, si generano i risultati d'interesse per la conoscenza del comportamento del materiale. I risultati raggiunti nelle figure 4.29 e 4.31 evidenziano i differenti comportamenti dei materiali in relazione alle loro proprietà e alle diverse condizioni delle prove. L'acciaio presenta caratteristiche di elevata conducibilità termica e tende a scaldarsi molto facilmente quando eccitato con una sorgente termica. Il materiale ceramico, invece, presenta un comportamento molto isolante e una bassa conducibilità termica. Infatti, come evidenziato dagli andamenti generati negli *Spot* nelle figure 4.17 e 4.18, l'acciaio assume un comportamento differente dalla ceramica. Questa differenza è ben visibile anche dagli spettri dell'ampiezza e della fase presentati nel capitolo dell'*analisi nel dominio della frequenza*. Un'analisi generale degli andamenti evidenzia subito i diversi comportamenti dei due materiali. In particolare si nota che:

- gli andamenti dell'ampiezza sono più ripidi nel caso del materiale ceramico rispetto all'acciaio.
- gli andamenti della fase sono differenti per i due materiali. Entrambe le curve, però, confermano gli andamenti di una risposta libera del sistema.
- le diverse condizioni di prova rappresentate in figura 4.12 realizzano gli stessi comportamenti della fase e dell'ampiezza per i due materiali. Le differenze si manifestano nei valori raggiunti per il coinvolgimento di differenti livelli di riscaldamento durante le prove.

Analizzando nel dettaglio l'andamento delle ampiezze in figura 4.29 si mette in evidenza che:

- una sollecitazione termica realizzata a basse frequenze genera delle ampiezze di temperatura maggiore. Il motivo risieda nella capacità delle basse frequenze di coinvolgere onde termiche con una lunghezza di diffusione maggiore, come analizzato nel capitolo dello *stato dell'arte* attraverso l'equazione 2.17. I materiali raggiungono valori molto alti perchè l'energia trasmessa con la sorgente di eccitazione riesce a scaldare in profondità i campioni.
- una sollecitazione termica realizzata alle alte frequenze genera dei contributi di temperatura che presentano ampiezze minori rispetto alle basse frequenze. Il fenomeno che si instaura è opposto a quello descritto precedentemente in quanto il riscaldamento avviene nella parte superficiale dei campioni.
- la diversa pendenza tra l'acciaio e la ceramica può essere descritta dalle loro differenti caratteristiche. La pendenza maggiore per le curve del ceramico

equivale a un maggiore dislivello di ampiezza di temperatura tra i valori raggiunti alle alte e alle basse frequenze. Nel caso dell'acciaio, invece, la pendenza è minore interessando un dislivello ridotto di ampiezza di temperatura. Alle basse frequenze, coinvolgendo un riscaldamento in profondità sul campione, la ridotta conducibilità termica della ceramica farà si che le ampiezze di temperatura siano maggiori per la sua difficoltà nel condurre il calore che riceve. Alle alte frequenze, riscaldando solamente la zona superficiale, il materiale metterà in evidenza le sue caratteristiche di isolante riscaldandosi meno. Questa differenza tra i valori raggiunti nei due campi di frequenza permette di ottenere un maggiore dislivello di ampiezza di temperatura. Invece, per quanto riguarda l'acciaio, la sua elevata conducibilità termica farà si che il riscaldamento coinvolto alle basse frequenze sia trasmesso all'interno del campione ottenendo delle ampiezze di temperatura non molto differenti. Il riscaldamento superficiale alle alte frequenze permetterà comunque al materiale un basso aumento di temperatura. Il bilancio complessivo sarà un decremento di temperatura ridotto rispetto a quello della ceramica. Il confronto numerico tra gli andamenti, invece, permette di descrivere come variano i valori raggiunti dai due materiali in base alle condizioni delle prove.

Analizzando lo spettro della fase in figura 4.31 si evidenzia:

- come l'energia in arrivo dalla sorgente termica viene dissipata oppure restituita in maniera elastica lungo le diverse frequenze.
- un andamento abbastanza piatto per i due materiali che è classico di una risposta libera. Si percepisce, però, una piccola differenza tra l'acciaio e la ceramica. L'acciaio manifesta due lievi picchi in grado di descrivere eventuali comportamenti differenti in base alle frequenze di eccitazione termica. La ceramica, invece, traduce la sua caratteristica di bassa conducibilità termica con un andamento piatto su quasi tutto il dominio della frequenza. Questo fenomeno si potrebbe interpretare con l'equazione 2.15. Dato un certo istante di tempo e una generica coordinata, l'andamento di temperatura ad una determinata frequenza sarà definito da 2.15. La risposta dei materiali, quindi, tenderà ad assumere in base alle diverse frequenze una tendenza sinusoidale con dei massimi e dei minimi.

Dall'analisi delle variazioni percentuali attraverso le tabelle 4.10 e 4.11 si mette in evidenza come i due materiali, a parità di condizione di prova, raggiungono valori diversi. In particolare:

• analizzando le alte frequenze si ottengono variazioni dell'ampiezza più pronunciate durante le prime prove dove il riscaldamento generato con la sorgente termica è maggiore. L'acciaio, quindi, tenderebbe comunque a scaldarsi quando si utilizza una quantità di calore maggiore anche se non riesce ad entrare in profondità per la ridotta lunghezza di diffusione. L'aumento del valore per il test 7 potrebbe descrivere problematiche nel segnale visto il pessimo rapporto segnale rumore alle alte frequenze.

- analizzando le basse frequenze si mettono in evidenza variazioni dell'ampiezza che risultano più pronunciate nelle ultime prove dove il riscaldamento generato con la sorgente termica è minore. Quindi sembrerebbe che riducendo il calore con cui si sollecita il sistema diventa più difficile portare i due materiali alla stessa ampiezza di temperatura anche se si riesce a diffondere in profondità.
- dalle variazioni della fase si evidenziano delle maggiori dissipazioni alle alte frequenze, visibili con un ordine di grandezza di differenza rispetto ai valori presenti alle basse frequenze. Però bisogna porre particolare attenzione al fatto che queste variazioni percentuali derivano da valori molto piccoli.

Per quanto riguarda i trend raggiunti dai valori delle intersezioni degli andamenti si nota che:

- la frequenza a cui avvengono comportamenti simili per l'ampiezza e la fase, tende ad aumentare al diminuire del riscaldamento generato sui campioni. Questo può essere sinonimo di un comportamento simile che si realizza quando i componenti sono scaldati sulla parte superficiale, visto lo spostamento alle alte frequenze, e impiegando delle minori quantità di calore.
- i valori dell'ampiezza diminuiscono con la diminuzione del calore introdotto durante le prove.
- i valori della fase aumentano ma sono sempre descritti da valori molto piccoli e simili tra loro.

Gli strumenti presentati per l'elaborazione delle analisi sperimentali hanno messo in atto un approccio al problema più *quantitativo* rispetto alle indagini *qualitative* presenti in letteratura. I risultati hanno evidenziato i differenti comportamenti dei materiali tenendo conto delle loro caratteristiche. L'analisi è avvenuta sia graficamente che numericamente analizzando i risultati in base alle condizioni delle prove e in base alla tipologia di materiale. Inoltre è stato possibile definire quali tecniche di termografia sono più adatte ad effettuare determinate analisi rispetto ad altre.

Capitolo 5

Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Lo studio realizzato in questa tesi ha definito una metodologia di analisi quantitativa per caratterizzare i materiali mediante la termografia attiva. La difficoltà maggiore per l'identificazione della metodologia più idonea deriva dal fatto che non sono presenti informazioni in letteratura riguardanti questi obiettivi. La termografia *attiva*, allo stato attuale, mette in pratica delle analisi qualitative attraverso delle immagini. Eventuali analisi che valutano le caratteristiche del materiale utilizzano degli algoritmi dove la termografia contribuisce solo in parte. I motivi della natura qualitativa delle analisi derivano principalmente dai campi di applicazione di queste tecniche. Nello stato dell'arte si è messo in evidenza come i principali utilizzi siano l'investigazione di difetti o il semplice reperimento degli andamenti di temperatura sul campione. L'obiettivo dell'analisi quantitativa messa a punto in questa tesi permette di caratterizzare i materiali in esame utilizzando il termogramma acquisito con la termocamera. Lo studio della letteratura riguardante la termografia *attiva* è stato di fondamentale importanza per affrontare la risoluzione del problema. Le informazioni raccolte hanno identificato tutto il lavoro svolto fino ad ora negli ambiti della termografia sottolineando anche quanto siano necessari ulteriori studi per migliorare le tecniche presenti attualmente. Dalle differenti logiche di analisi messe in atto si è constatato come la tecnica Lock-in non sia lo strumento adatto per la definizione di una metodologia utile per attuare la caratterizzazione dei materiali. Il motivo principale risiede nelle sue condizioni di studio nel campo dello stazionario e nella difficoltà di individuare quali frequenze sono idonee per estrarre le informazioni d'interesse dal punto di vista delle immagini di fase e di ampiezza del segnale termico. La logica che ha portato a risultati di maggiore interesse consiste in una metodologia di analisi del problema simile a quella messa in atto per la caratterizzazione di un sistema meccanico dal punto di vista dinamico. La tecnica di termografia attiva in grado di ragionare in termini di risposta libera del sistema è la tecnica *Pulsed*. Lo studio nel dominio della frequenza ha permesso di creare un'ulteriore continuità nel parallelismo con le vibrazioni in ambito meccanico sfruttando tutti i vantaggi che derivano dall'applicazione di questo approccio. Infatti l'utilizzo di strumenti come l'ampiezza e la fase del segnale sono stati di fondamentale importanza per identificare la metodologia più ottimale per la caratterizzazione dei materiali. La tecnica Pulsed Phase Thermography si è quindi rivelata quella migliore per analizzare le risposte termiche libere e ricavare le informazioni necessarie per lo scopo di questa tesi. Lo studio della risposta termica libera del sistema è avvenuto utilizzando un opportuno codice di calcolo realizzato con l'ambiente Matlab. Prima di elaborare i dati acquisiti, però, diventa necessario estrarre dal termogramma solamente il tratto d'interesse per lo studio. Gli strumenti dell'ampiezza e della fase sono stati essenziali per capire come i contributi di ampiezza e fase del segnale termico fossero influenzati dalle possibili frequenze di eccitazione. Le caratteristiche dei materiali in esame sono la risposta per descrivere quanto ottenuto in termini di risultati nel dominio della frequenza. L'approccio identificato in questa tesi è completamente differente da quelli messi in atto in letteratura per un'eventuale caratterizzazione dei materiali e la differenza sostanziale sta nel modo in cui viene eseguita. In letteratura sono presenti degli algoritmi che permettono di ricavare numericamente le caratteristiche dei materiali utilizzando la termografia come strumento per acquisire l'andamento di temperatura e usarlo in parallelo con dei modelli numerici, identificando così degli algoritmi di risoluzione. La metodologia proposta in questa tesi non ha come scopo il reperimento dei valori numerici delle proprietà dei materiali, ma ha l'obiettivo di mettere in risalto i loro comportamenti attraverso l'utilizzo diretto della termocamera ed effettuare analisi quantitative dai valori ricavati. Il software Irta si è rivelato uno strumento fondamentale per la messa a punto della logica ottimale di analisi del problema e per le elaborazioni dei dati. Non è stato possibile impiegarlo durante la logica di analisi definitiva in quanto la sua poca flessibilità di utilizzo non permette di realizzare le analisi volute nel dominio della frequenza. Il motivo deriva dal fatto che le indagini attraverso il tool Signal Information prendono in considerazione l'intera storia temporale. Questa condizione ha richiesto l'implementazione del codice Matlab per realizzare le analisi sui dati d'interesse con il conseguente ottenimento dei risultati proposti. Studi futuri utilizzeranno la tecnica Lock-in per investigare i materiali quando soggetti a delle forzanti termiche e individuare la loro risposta termica forzata continuando così a seguire la logica di analisi del problema attraverso il parallelismo con le vibrazioni meccaniche. Di sicuro seguiranno anche successivi studi che proseguiranno il lavoro affrontato in questa tesi per mettere a punto delle metodologie in grado di considerare i fenomeni di scambio termico che avvengono durante le prove. Infatti il mondo della termografia risulta in continua evoluzione perchè le ricerche in questi ambiti sono ancora vaste. La sua qualità di essere una tecnica non distruttiva permette di effettuare la ricerca sia su campioni in laboratorio che su componenti reali. In letteratura è stato fatto molto poco nell'ambito di componenti reali ma il motivo è dovuto alla poca conoscenza che si ha riguardo l'applicazione ottimale di queste tecniche. Inoltre, come evidenzia la letteratura, i campi di applicazione della termografia stanno aumentando notevolmente e questo è sinonimo della versatilità che contraddistingue questi strumenti di indagine. L'ottimizzazione delle tecniche esistenti va di pari passo con l'identificazione di nuove tecniche termografiche che a loro volta, però, necessiteranno di essere ottimizzate. Alla base di queste considerazioni rimane certo il notevole lavoro di ricerca che rimane da fare nel campo termografico per conoscere e sfruttare al meglio questi strumenti molto utili soprattutto in ambito meccanico.

Bibliografia

- A. R. URBANEK, J. B. Evaluation of the thermo-elastic behavior of a highalloyed steel by fourier transformation based lock-in-thermography. *QIRT*, 14 (2018).
- [2] AIJUN YIN, BIN GAO, G. Y. T. W. L. W. K. L. Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography. *American Institute of Physics, Journal of Applied Physics*, 113 (2013).
- [3] BAGAVAC, P. Lock-in thermography image processing.
- [4] BIN LIU, HAI ZHANG, H. F. X. M. Experimental evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (fod) in cfrp. *mdpi*, *Sensors*, 743 (2016).
- [5] BUSSE, G. Lockin-thermography: Principles, nde-applications, and trends.
- [6] CHANGHANG XU, JING XIE, W. H. G. C. X. G. Improving defect visibility in square pulse thermography of metallic components using correlation analysis. *Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing*, 103 (2018), 162–173.
- [7] D. WU, W. KARPEN, G. B. Lockin thermography for multiplex photothermal nondestructive evaluation. *EETI, Quantitative InfraRed Thermography Conference*, 92 - Eurotherm Series 27 (1992).
- [8] DATONG WU, G. B. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. *Elsevier*, 37.
- [9] DEBOSHREE ROY, S. T. Efficient snr determination algorithm for lock-in thermogaphy defect detection and quantification. *IEEE* (2016).
- [10] DES. Manuale: Multides system laser (www.desinnovation.com).
- [11] F. J. MADRUGA, P. ALBENDEA, C. I.-C. J. M. L.-H. Signal to noise ratio (snr) comparison for lock-in thermographic data processing methods in cfrp specimen. *QIRT*, 10 (2010).
- [12] G. BUSSE, M. BAUER, W. R. D. W. Lockin vibrothermal inspection of polymer composites. *QIRT*, 92 - Eurotherm Series 27 (1992).
- [13] G. PITARRESI, A. L. Implementazione di tecniche di termografia attiva irndt su compositi grp mediante la deposizione di impulsi termici di lunga durata. AIAS, 163 (2011).
- [14] GONG JINLONG, LIU JUNYAN, W. F. W. Y. Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation the size and depth of subsurface defects of

cfrp composite using lock-in thermography. Elsevier, Infrared Physics & Technology, 71 (2015), 439–447.

- [15] HICHAM HALLOUA, ABDELLATIF OBBADI, Y. E. S. S. A. E. Nondestructive inverse approach for determining thermal and geometrical properties of internal defects in cfrp composites by lock-in thermography. *IEEE* (2016).
- [16] J.A. SIDDIQUI, V. ARORA, R. M. A. M. Infrared thermal wave imaging for nondestructive testing of fibre reinforced polymers. *Experimental Mechanics*, 55 (2015), 1239–1245.
- [17] LIU JUNYAN, WANG YANG, D. J. Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for ndt. *Elsevier*, *Infrared Physics & Technology*, 53 (2010), 348–357.
- [18] M. CALÌ, G. LA ROSA, F. L. S. L. M. Valutazione della propagazione di cricche in provini saldati con tecniche di emissione acustica e termografica.
- [19] M. RAHAMMER, P. MENNER, G. B. Thermal waves for nde of aircraft: comparison of lockin thermography and lockin interferometry. *Taylor & Francis*, *QIRT*, no. 1 vol. 10 (2013), 42–54.
- [20] P. DARYABOR, M. S. Comparison of three thermographic post processing methods for the assessment of a repaired aluminum plate with composite patch. *Elservier, Infrared Physics & Technology*, 79 (2016), 58–67.
- [21] RIEGER, G. Lockin and burst-phase induction thermography for nde. *Taylor & Francis, QIRT*, no. 2 vol. 3 (2006), 141–154.
- [22] SIAVASH DOSHVARPASSAND, CHANGZHI WU, X. W. An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography. *Elsevier*, *Infrared Physics & Technology*, 96 (2019), 366–389.
- [23] TH. ZWESCHPER, A. DILLENZ, G. B. Ultrasound lockin thermography a ndt method for the inspection of aerospace structures. *QIRT*.
- [24] VANITA ARORA, RAVIBABU MULAVEESALA, P. B. Effect of spectral reshaping on frequency modulated thermal wave imaging for non-destructive testing and evaluation of steel material. *Springer Science, Nondestruct Eval*, no. 15 vol. 35 (2016).
- [25] W. BEN LARBI, C. IBARRA-CASTANEDO, M. K. A. B. X. M. Experimental comparison of lock-in and pulsed thermography for the nondestructive evaluation of aerospace materials.
- [26] YUN-KYUAN, JIMINKIM, H. Laser lock-in thermography for detection of surface-breaking fatigue cracks on uncoated steel structures. *Elsevier*, *NDT&E International*, 65 (2014), 54–63.