



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea
Magistrale in
Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Tecnica della termografia attiva applicata a
campioni di spessore variabile : studio numerico e
sperimentale**

Relatore:
Prof. Francesca Maria Curà

Candidato:
Matteo Greco

Correlatori:
Prof.ssa Raffaella Sesana

Matricola
253391

Anno accademico 2020/2021

Sessione di Laurea Dicembre 2021

1	SOMMARIO	
	Tesi di Laurea Magistrale	1
2	INTRODUZIONE TESI	10
3	STATO DELL'ARTE	12
3.1	TEORIA BASE DELLA TERMOGRAFIA	12
3.2	TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI	17
3.3	TECNICHE TERMOGRAFICHE	19
3.3.1	TERMOGRAFIA PASSIVA	20
3.4	TERMOGRAFIA ATTIVA	20
3.4.1	TERMOGRAFIA ATTIVA 'PULSED'	23
3.5	FISICA DEL PROBLEMA	24
3.5.1	MODELLI ID EQUAZIONE DEL CALORE	25
3.5.2	APPLICAZIONE A COMPONENTI CON SPESSORE VARIABILE	27
3.6	PROBLEMA INVERSO	29
3.7	MODELLI FEM IN LETTERATURA	29
4	MATERIALI E METODI	34
4.1	STRUMENTAZIONE	35
4.1.1	TERMOCAMERA	37
4.1.2	LASER	40
4.1.3	SOFTWARE ANALISI TERMOGRAMMA	41
4.2	PROVE SPERIMENTALI	42
4.2.1	PROVINI ACCIAIO	44
4.2.2	PROVINI ALLUMINIO	46
3	ELABORAZIONI E ANALISI DATI	49
4.3	MODELLI ANALITICI	50
4.3.1	Modello di corpo semi infinito	50
4.3.2	Modello piastra spessore finito	51
4.3.3	Lastra a due spessori	52
4.4	ELABORAZIONE DATI SPERIMENTALI	52
4.4.1	PROVINI ACCIAIO	54

4.4.2	SCALETTA ALLUMINIO	58
4.5	COSTRUZIONE MODELLI FEM.....	62
4.5.1	Ansys thermal analysis	63
4.5.2	LASTRA PIANA FINITA.....	67
4.5.3	ANALISI QUANTITATIVA	75
4.6	ERRORE EMISSIVITA'	79
5	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	82
6	BIBLIOGRAFIA	84

INDICE TABELLE

Tabella 1 Caratteristiche termocamera Flir	38
Tabella 2 Caratteristiche da catalogo Laser	40
Tabella 3 Riepilogo dati set up per laser e termocamera.....	45
Tabella 4 Riepilogo dati di set up provino in acciaio verniciato	46
Tabella 5 Dati set up e settaggi laser provini in alluminio non verniciato	46
Tabella 6 Dati set up e settaggi laser provini in alluminio verniciato.....	47
Tabella 7 Tabella suddivisione dei tempi Ansys	66
Tabella 8 Tabella inserimento forzante termica Ansys.....	66
Tabella 9 Temperature massime lastra singolo spessore, Ansys.....	71
Tabella 10 tabella analisi di sensitività.....	73
Tabella 11 Analisi sensitività modello Ansys.....	77
Tabella 12 Confronto temperature massime sperimentali e numeriche, prima ipotesi...78	
Tabella 13 Confronto temperature massime sperimentali e numeriche mesh quadrangolare.....	79

INDICE FIGURE

Figura 1 Spettro di rifrazione.....	12
Figura 2 Emittanza spettrale.....	13
Figura 3 Ambiti di diffusione termografia	19
Figura 4 Schema semplificato per prove di termografia passiva	20
Figura 5 Termografia attiva tipologie di fonte termica.....	21
Figura 6 Schema in riflessione e contributi di emissione, riflessione e trasmissione.al segnale.....	22
Figura 7 Schema prova in modalità trasmissione.....	22
Figura 8 Scambio termico di tipo 1D (destra) o di tipo 3D (sinistra)	25
Figura 9 Modello di corpo seminfinito.....	26
Figura 10 Modello lastra seminfinita a spessore finito.....	27
Figura 11 Modello geometrico lastra a due spessori.....	28
Figura 12 Modello lastra con foro centrale.....	28
Figura 13 Inserimento condizioni al bordo Fem.....	30
Figura 14 Mesh creata da solutore commerciale	30
Figura 15 Penetrazione calore dopo 15 ms.....	31
Figura 16 Confronto mesh elementi triangolari e quadrangolari.....	32
Figura 17 Mesh con soli elementi rettangolari	32
Figura 18 Schema strumentazione termografia attiva	34
Figura 19 Schema strumentazione laboratorio Politecnico	36
Figura 20 Banco prova completo laboratorio.....	37
Figura 21 Telecamera Flir A6751sx	38
Figura 22 Termocamera con relativo sistema di fissaggio.....	39

Figura 23 Schermata di analisi de termogramma mediante ResearchIR	40
Figura 24 Interfaccia irta con termogramma e dello spot track.....	42
Figura 25 Vista in sezione ed assonometrica della 'scaletta'	43
Figura 26 Modello di forzante usato nelle prove	43
Figura 27 Schema logico di esecuzione delle prove.....	44
Figura 28 Provini in alluminio non verniciato	45
Figura 29 Provino in acciaio verniciato.....	45
Figura 30 Provini in acciaio non verniciato.....	46
Figura 31 Flow Chart del lavoro di Tesi	49
Figura 32 Soluzione analitica corpo seminfinito scala decimale	50
Figura 33 Soluzione analitica corpo seminfinito scala logaritmica.....	51
Figura 34 soluzione analitica lastra seminfinita scala logaritmica.....	51
Figura 35 Andamento temperatura modello lastra a due spessori, scala decimale.....	52
Figura 36 Schema acquisizione termogramma	53
Figura 37 Evoluzione temperatura scaletta gradino 10,04 mm.....	54
Figura 38 Evoluzione temperatura scaletta gradino 2,5 mm	55
Figura 39 Temperatura acciaio non verniciato 2,5 mm, solo raffreddamento	56
Figura 40 Temperatura acciaio non verniciato 2,5 mm, solo raffreddamento, tutte le prove.....	56
Figura 41 Risposta in frequenza segnale 2,5 mm acciaio, Ampiezza	57
Figura 42 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Ampiezza.....	57
Figura 43 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Fase.....	58
Figura 44 Evoluzione temperatura scaletta 2,5 mm.....	59
Figura 45 Evoluzione temperatura scaletta 10,04 mm.....	59
Figura 46 Risposta in frequenza segnale 2,5 mm alluminio, Ampiezza	60
Figura 47 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Ampiezza.....	61
Figura 48 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Fase	61
Figura 49 Schema logico analisi modelli fem.....	63

Figura 50 Interfaccia Workbench Ansys.....	64
Figura 51 tabella di inserimento dati del materiale.....	65
Figura 52 esempio mesh scaletta.....	65
Figura 53 Interfaccia del 'setup'	66
Figura 54 Vista assonometrica lastra piana finita	67
Figura 55 Andamento lineare di temperatura con lastra piana	67
Figura 56 Distribuzione di temperatura della piastra dopo 10 s e 100 s	68
Figura 57 Andamento temperatura lastra piana finita in stazionario.....	68
Figura 58 Lastra piana forzante uniforme	69
Figura 59 Mesh della lastra con transitorio termico	69
Figura 60 Transitorio lastra piana finita forzante uniforme, Ansys	70
Figura 61 sorgente puntiforme caso simmetrico	70
Figura 62 Quote scaletta	71
Figura 63 Scaletta con spot laser	72
Figura 64 forzante termica Ansys.....	72
Figura 65 Esempio mesh mista.....	73
Figura 66 Analisi sensitività Mesh.....	74
Figura 67 Scaletta analisi qualitativa transitorio termico, Ansys	74
Figura 68 Scaletta mesh di prima ipotesi.....	75
Figura 69 Andamento temperatura gradino 2,5 mm, Ansys	76
Figura 70 Andamento temperatura scalino 10,04 mm, Ansys.....	77
Figura 71 Mesh elementi quadrangolari con raffinamento lungo lo spessore	78
Figura 72 Mesh modello semplificato a 5 gradini.....	78
Figura 73 Dettaglio infittimento mesh lungo lo spessore.....	79
Figura 74 evoluzione temperatura con emissività sbagliata	80

2 INTRODUZIONE TESI

La tecnica della termografia è una metodologia di analisi utilizzata nei più svariati settori, dalla meccanica all'aerospaziale fino all'edilizia ed al campo agricolo. In ambito meccanico l'obiettivo risiede nell'effettuare sul componente delle prove di tipo non distruttivo per individuare delle anomalie quali corrosione, frattura e fatica. In generale è anche possibile lavorare in 'real time' in modo da avere un raffronto diretto con quanto oggetto di indagine. Particolare interesse e ricerca sono relativi a tecniche termografiche di tipo attivo. Il riscaldamento del campione esaminato, con specifiche sorgenti termiche, permette l'individuazione di aspetti difficilmente visibili con tecniche termografiche convenzionali. In particolare, è possibile passare ad un approccio di analisi che diventa più quantitativo che qualitativo.

Il lavoro presentato esamina il comportamento della tecnica della termografia attiva nello studio di campioni a spessore variabile non solo dal punto di vista sperimentale ma anche numerico. La classificazione avviene in base alla natura della forzante termica, dalle lampade alogene fino ad i laser, che si differenziano in base al tipo di riscaldamento, da uniforme fino a diventare quasi puntiforme. La metodologia termografica utilizzata nel presente studio è quella di tipo ottico. La scelta è dipesa dal materiale a disposizione. Infatti, la strumentazione presente al Politecnico presso il dipartimento di Meccanica ed Aerospaziale (DIMEAS) ha in dotazione, oltre alla indispensabile termocamera, un laser. Con sorgenti di tipo ottico è possibile settare funzioni termiche di varia natura. Nel caso studio è stata valutata la risposta all'impulso, delta di Dirac. La tecnica con queste caratteristiche è chiamata 'pulsed'

La logica seguita nell'elaborazione della tesi comprende un lavoro parallelo tra sperimentale e numerico. In questa maniera è possibile confrontare le analisi sperimentali ricavate tramite prove in laboratorio con soluzioni analitiche e modelli agli elementi finiti appositamente costruiti. La temperatura è la costante presenza cui fanno riferimento parametri e geometrie trattati.

La prima parte dell'elaborato è occupata dallo Stato dell'Arte in cui si riportano tutte le informazioni che sono state consultate per comprendere la tecnica e la base fisica del problema. Solo dopo un'attenta redazione di questa fase si è potuto procedere. Nella sezione Materiali e Metodi si è descritto tutto il materiale e la strumentazione utilizzati per la corretta definizione delle prove sperimentali. Si è entrato più nel dettaglio rispetto a queste tematiche rispetto a quanto fatto nello stato dell'arte. Nel capitolo relativo alle elaborazioni si è passati ad un aspetto operativo. Si può dividere questa sezione in tre

grandi parti in base alla tipologia di informazioni trattate, analitica, sperimentale e simulazione. Ci si occupa rispettivamente di riproduzione di modelli analitici presenti in letteratura con dati consoni al problema, di estrazione ed elaborazione di prove di laboratorio su provini, per concludere con la creazione di modelli fem. I risultati ed i confronti, con quanto fatto fino a questo punto, sono oggetto dell'ultimo capitolo: Risultati. Sono proposti possibili spunti da poter sviluppare in lavori successivi.

3 STATO DELL'ARTE

In questo capitolo vengono riportate le informazioni necessarie per conoscere e comprendere il successivo lavoro di Tesi svolto. Sono presenti in letteratura diversi studi e ricerche che negli ultimi anni hanno analizzato tecniche termografiche non solo dal punto di vista teorico ma anche sperimentale. Si è partiti con la ricerca e l'organizzazione del materiale bibliografico con il fine di comprendere e inquadrare la tecnica in generale passando ad una ricerca specifica finalizzata allo studio di elementi con spessori variabili. Ci si è soffermati sulla tecnica termografica di tipo attivo 'pulsed' in modo da poter sfruttare la strumentazione presente presso Il DIMEAS al Politecnico di Torino. La ricerca di articoli e informazioni ha circoscritto il campo all'ambito meccanico.

3.1 TEORIA BASE DELLA TERMOGRAFIA

La termografia infrarosso sfrutta la capacità di un corpo di emettere una radiazione nel campo infrarosso se si trova ad una temperatura superiore agli 0 K. Si deve proprio partire dallo studio delle onde termiche per comprenderne le basi del funzionamento. Si lavora in particolare nel range tra 0,75 – 1000 μm [2] al di fuori dello spettro del visibile. In questa banda si raggiungono le temperature più elevate.

Il range di interesse dello spettro di rifrazione viene riportato nell'immagine seguente.

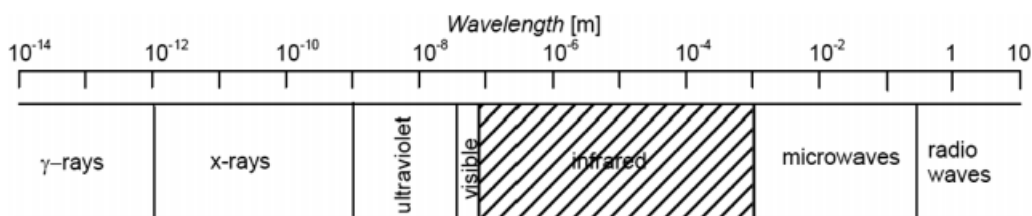


Figura 1 Spettro di rifrazione

La capacità del corpo di emettere una radiazione viene definita emissività ed è rilevata mediante una termocamera. Il fulcro del problema verte sul calcolo della temperatura partendo proprio dalla misura di emissività.

L'approccio utilizzato per partire a definire il fenomeno si basa sugli studi di Kirchhoff. Per semplificare la trattazione inserì nella sua analisi il concetto di un corpo ideale, chiamato corpo nero, non in grado di riflettere o trasmettere ma assorbire la radiazione incidente. Caratteristica peculiare di nostro interesse è rappresentata dal fatto che il corpo nero è un perfetto emettitore ovvero emette solo le radiazioni che riesce ad assorbire.

La legge fisica alla base del fenomeno è la Legge di Plank nella quale viene descritta la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero.

Viene riportata l'equazione (1) seguente.

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{hc} * 10^{-6} \quad (1)$$

$$\lambda^5 * (e^{\lambda kT} - 1)$$

In cui:

- $W_{\lambda b}$ è l'emittanza spettrale di un corpo nero alla lunghezza d'onda, unità di misura $\frac{W}{m^2 * \mu m}$
- c è la velocità della luce, pari a $3 \cdot 10^8$ m/s;
- h è la costante di Planck, pari a $6,6 \cdot 10^{-34}$ Joule s;
- k è la costante di Boltzmann, pari a $1,38 \cdot 10^{-23}$ Joule/K;
- T è la temperatura assoluta del corpo nero, espressa in K;
- λ è la lunghezza d'onda della radiazione emessa, espressa in μm ;
- 10^{-6} è il fattore di conversione da m a μm .

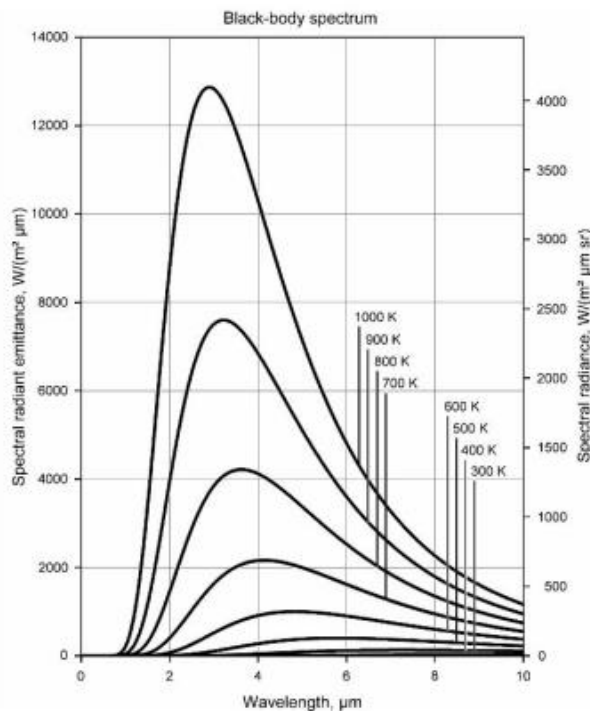


Figura 2 Emittanza spettrale

Come è possibile notare dalla figura 2, l'emittanza spettrale di un corpo nero è nulla per $\lambda = 0$ e per valori di λ molto elevati; raggiunge il suo massimo in corrispondenza di una lunghezza d'onda pari a λ_{max} il cui valore è inversamente proporzionale al valore della

temperatura. Tramite derivazione della legge di Planck , equazione (1), rispetto a λ , Wien identificò una semplice formula per il calcolo di tale lunghezza d'onda espressa in [μm]:

$$\lambda = 2898/T \quad (2)$$

Passando all'equazione di Stefan Boltzmann ottenuta per integrazione della precedente sull'intero spettro di lunghezze d'onda. Si ottiene intensità totale delle radiazioni come riportato in [1]

$$E_b = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_b t}} - 1 \right)} * \lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

Con E_b si indica l'intensità totale della radiazione messa corrispondente all'area sottesa alla curva di Planck, figura 2, per un determinato livello di temperatura. l'unità di misura è il $\frac{W}{m^2}$.

Il secondo termine dell'equazione si deve a Boltzmann; dimostrò sperimentalmente la dipendenza quarta della temperatura assoluta. Il coefficiente di proporzionalità σ è la costante di Stefan-Boltzmann.

Il corpo reale non viene trattato come corpo nero bensì come corpo grigio. La differenza sta nella non dipendenza dalla frequenza e dall'emissività non più unitaria, $\varepsilon < 1$. Alcuni casi reali possono avvicinarsi al caso particolare di corpo nero nel caso in cui, per esempio, vengano effettuati dei ricoprimenti superficiali.

Un corpo reale, come anticipato, non è in grado di assorbire tutta la radiazione su di esso incidente poiché una frazione di quest'ultima viene riflessa dalla sua superficie e un'ulteriore frazione viene trasmessa attraverso il corpo stesso. I parametri rappresentanti le frazioni assorbita, riflessa e trasmessa dal corpo reale sono dipendenti dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e sono definiti come segue:

- α_λ assorbanza spettrale, definita come il rapporto tra la potenza spettrale assorbita dall'oggetto e la potenza spettrale incidente sullo stesso;
- ρ_λ riflettanza spettrale, pari al rapporto tra la potenza spettrale riflessa dalla superficie del corpo rispetto a quella incidente;
- r_λ trasmittanza spettrale, definita come il rapporto tra la potenza spettrale

trasmessa attraverso l'oggetto e la potenza spettrale incidente sullo stesso; nel caso di un materiale opaco, il valore di tale parametro è nullo.

Trattandosi di parametri definiti da frazioni della potenza incidente, la somma dei tre contributi deve restituire un numero intero:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + r_{\lambda} = 1$$

La capacità di un corpo reale di emettere la radiazione elettromagnetica assorbita è limitata da un quarto elemento, anticipato precedentemente, ovvero l'emissività, il cui valore è sempre pari ad α_{λ} a causa della sopra menzionata legge di Kirchhoff. Per lo studio ai corpi reali è stato introdotto il parametro ε_{λ} .

- ε_{λ} emissività spettrale o emittanza, definita come il rapporto tra la potenza spettrale emessa dal corpo reale e la potenza spettrale emessa da un corpo nero alla medesima temperatura e lunghezza d'onda.
Nel caso di un corpo nero, l'emissività spettrale ha valore pari a $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon = 1$; nel caso di un corpo grigio, il suo valore è indipendente dalla lunghezza d'onda e $\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon < 1$; infine considerando un materiale altamente lucidato, $\varepsilon_{\lambda} \cong 0$.

L'introduzione del parametro ε_{λ} ha consentito di correggere le leggi fisiche su cui si basava la teoria della termografia e di adattarle ai corpi reali. La potenza totale emessa da un corpo grigio, ad esempio, può essere espressa tramite la legge di Stefan-Boltzmann modificata come segue:

$$W = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (4)$$

Poiché negli esperimenti il valore medio di emissività di un corpo reale nell'intervallo di lunghezze d'onda in cui la termocamera opera è normalmente ipotizzato, è pratica comune considerare il generico oggetto reale assimilabile ad un corpo grigio, la cui caratteristica è di avere un valore di emissività indipendente dalla lunghezza d'onda. La meticolosa calibrazione del valore di emissività del corpo, ispezionato durante un esperimento termografico, consente di misurare accuratamente l'energia elettromagnetica emessa e conseguentemente di derivare con precisione i valori di

temperatura di ogni punto.

Negli esperimenti, tuttavia, l'emissività non è l'unico fattore da cui dipende l'accuratezza dell'ispezione termografica. La termocamera, infatti, non acquisisce solo la radiazione emessa dall'oggetto analizzato, ma anche la radiazione riflessa dal corpo generata da sorgenti presenti nell'ambiente circostante e la radiazione emessa dall'atmosfera interposta tra termocamera e oggetto ispezionato. Un quarto contributo dovuto alla diffusione nell'atmosfera di radiazioni provenienti da fonti esterne al campo di osservazione, come ad esempio la luce solare, può essere generalmente trascurato poiché supposto di lieve entità; è compito dell'operatore modificare le condizioni sperimentali al fine di minimizzare i disturbi, ad esempio utilizzando schermature (vedi sezione Materiali e Metodi) o modificando la direzione di osservazione. La potenza della radiazione totale ricevuta dalla termocamera può essere quindi espressa come la somma dei tre contributi sopra citati:

$$W_{tot} = W_{obj} + W_{refl} + W_{atm} \quad (5)$$

In cui:

- W_{obj} è l'intensità della radiazione emessa dal corpo analizzato, il quale è caratterizzato da emissività ε_{obj} e temperatura assoluta T_{obj} ;
- W_{refl} è l'intensità della radiazione riflessa dal corpo e generata da sorgenti esterne, le quali sono caratterizzate da temperatura assoluta T_{refl} ipotizzata uguale per tutte le sorgenti. La riflettanza dell'oggetto opaco ispezionato è pari a $\rho_{obj} = 1 - \varepsilon_{obj}$;
- W_{atm} è l'intensità della radiazione emessa dall'atmosfera, la quale è caratterizzata da temperatura assoluta T_{atm} , trasmittanza τ_{atm} ed emissività $\varepsilon_{atm} = 1 - \tau_{atm}$.

Applicando la legge di Stefan-Boltzmann adattata per i corpi grigi/reali, è possibile esprimere la somma dei contributi come segue:

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj}\tau_{atm}\bar{\sigma}T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon_{obj})\tau_{atm}\bar{\sigma}T_{refl}^4 + (1 - \tau_{atm})\bar{\sigma}T_{atm}^4 \quad (6)$$

Per avere una visione più chiara di quanto esposto riguardo i singoli contributi si faccia riferimento a figura 6.

Considerando tutti questi fattori si calcola la temperatura dell'oggetto con la seguente formula:

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{E_{tot} - (1 - \varepsilon_{obj}) * \bar{\tau}_{atm} * \bar{\sigma} * (T_{refl})^4 - (1 - \bar{\tau}_{atm}) * \bar{\sigma} * (T_{atm})^4}{\varepsilon_{obj} * \bar{\tau}_{atm} * \bar{\sigma}}} \quad (7)$$

La taratura di ε_{obj} e T_{refl} rappresenta la fase più importante di calibrazione nell'ispezione termografica chiamata 'compensazione'. Risultando un processo complesso, la procedura di calibrazione viene esaminata nelle normative ASTM E1862-14 [3], ASTM E1933-14[4] e ISO 18434-1:2012 [5].

3.2 TERMOGRAFIA AD INFRAROSSI

Con termografia ad infrarossi si indica la tecnica di acquisizione di immagini che rappresentano lo stato termico e le sue variazioni spaziali e temporali. La radiazione elettromagnetica viene registrata nel tempo e nello spazio da una termocamera.

L'aspetto che ne sta favorendo il crescente interesse è la sua versatilità e adattabilità.

Possiamo elencare vari vantaggi:

- Possibilità di ispezione da remoto: essendo un metodo di controllo non a contatto può essere utilizzata per distanze che variano da pochi millimetri fino a diversi chilometri;
- Range di misurazioni: variando il sistema di ottica e sensoristica è possibile misurare temperature che variano tra i 20° fino ad arrivare a 1600° C, con sensibilità di lettura anche del centesimo di grado;
- Portabilità: oggi è possibile trasportare l'intera strumentazione con estrema facilità dato il suo peso e le dimensioni ridotte;
- Visibilità: è possibile effettuare misurazioni anche in presenza di fumo o nebbia, data la capacità di penetrazione delle radiazioni termiche, rispetto alla capacità di penetrazione delle radiazioni nel campo del visibile;
- Area di investigazione ampia: rispetto ad altre tecnologie la termografia consente di investigare simultaneamente più zone, anche di dimensioni maggiori, il tutto con un'alta frequenza di acquisizione;
- Manipolazione dati: i dati registrati possono essere processati anche da un

comune PC con il solo ausilio di software dedicati alle analisi dati.

Come ogni tecnologia presente in un qualsiasi campo industriale, la termografia presenta anche degli svantaggi, quali ad esempio:

- Personale qualificato: al fine di una corretta analisi è necessario che il personale conosca almeno i principi fisici alla base della termografia e che abbia acquisito abbastanza esperienza con la strumentazione;
- Influenza delle condizioni climatiche: nel caso di analisi in ambiente aperto le condizioni atmosferiche possono giocare un ruolo fondamentale nei risultati ottenuti. Nel caso invece di misurazioni in ambienti chiusi, può essere necessario schermare il target dalle radiazioni dell'ambiente circostante;
- Costo: l'attrezzatura ha costi non sempre trascurabili, tra i quali anche eventuali costi per le licenze software;
- Veridicità dei risultati: difficoltà di ottenere dati precisi, soprattutto per materiali che presentano bassa emissività. In alcuni casi si può prevedere di effettuare delle misurazioni con metodi a contatto per poi andare a correggere i dati acquisiti in termografia. In alcuni casi si predilige un'analisi qualitativa piuttosto che un'analisi quantitativa.

Può trovare impiego nei più svariati ambiti dalle costruzioni alle fonti rinnovabili al settore industriale ed elettrico. I principali campi di utilizzo vengono riportati in [1] da cui proviene la tabella seguente.

Industry	Sub-industry	Application	Inspected for	
Civil	Building & Masonry structure	SHM/CM	Defect/ Degradation detection	
		NDE	Energy loss/ Thermal bridging Leak/ Moisture detection Component performance/ Defect evaluation	
	Bridges	SHM/CM	Defect detection	
		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	
	Composite	-	NDE	Impact defect/ Delamination detection
			DPA	Dis-bonding/Patch repair
				Impact defect characterization Fatigue defect characterization
Electrical	Power	SHM	Defect detection (power plants/transformers)	
	Electronics	NDE	Soldering/Connection inspection PCB/IC/Semi-conductors inspection	
				Battery inspection
Machinery	Motors	CM	Defect/Abnormal temperature	
	Bearings	CM	Defect/Abnormal temperature	
	Nuclear	CM	Defect/Abnormal temperature	
	Heat Exchangers	CM	Defect/Leakage/Abnormal temperature	
Renewable	Solar	SHM	Structural defect/ Abnormal temperature	
	Wind	NDE	Structural defects	
Metallic Material/ Structure	-	NDE	Metal loss defect detection/characterisation	
		NDE	Crack defect detection	
		DPA	Fatigue defect detection	
		NDE	Weld defect/Crack detection	
		SHM/CM	Leakage detection	

Figura 3 Ambiti di diffusione termografia

L'applicazione di interesse nel presente elaborato verterà sull'ambito dei materiali metallici che presentano variazione di spessore.

3.3 TECNICHE TERMOGRAFICHE

La termografia ad infrarossi si divide in due grandi categorie in base alla presenza o meno di uno specifico sistema di eccitazione termica. Si parla rispettivamente di tecniche termografiche di tipo attivo e passivo

3.3.1 TERMOGRAFIA PASSIVA

La termografia passiva acquisisce le radiazioni emesse dal corpo senza l'ausilio di fonti di eccitazione esterne. Viene normalmente impiegata quando l'oggetto di analisi presenta proprietà termiche differenti da quelle dell'ambiente circostante. Si riporta uno schema semplificato per effettuare prove di termografia passiva nella successiva figura 4.

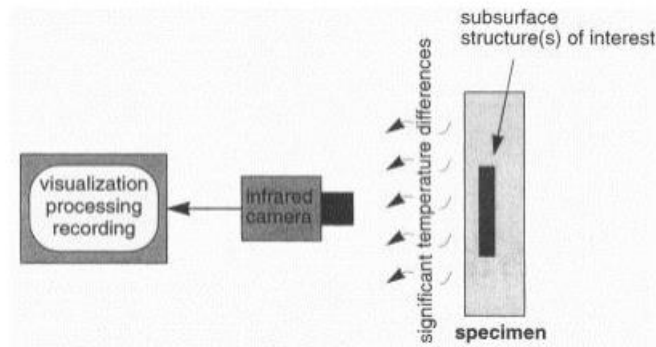


Figura 4 Schema semplificato per prove di termografia passiva

I campi di applicazione variano in diversi ambiti dall'agricoltura, alla medicina, alla termo-fluidodinamica, all'analisi di componenti elettronici, alla prevenzione di guasti negli impianti. Il principale obiettivo quando si lavora con tecniche passive è la rilevazione di difetti dell'oggetto di analisi. La manifestazione di tali difetti si evidenzia con anomalie termiche in zone che invece dovrebbero essere termicamente omogenee. La difficoltà di utilizzo è relativa alla limitata sensibilità, l'immagine termografica risulta sfocata per via della diffusione del calore. Per questa ragione l'individuazione dei difetti risulta più agevole in presenza di elevate differenze termiche. I campi principe in applicazioni di termografia passiva sono la diagnostica dei problemi di isolamento o danneggiamento in ambito civile o, in ambito meccanico, nella propagazione della frattura indotta da sollecitazioni a fatica.

3.4 TERMOGRAFIA ATTIVA

In termografia attiva, accanto alla termocamera già necessaria per tecniche con approccio passivo, è presente una forzante esterna con l'apposito scopo di riscaldare o raffreddare il corpo oggetto di studio. Si passa in questo modo da un approccio più di tipo qualitativo ad uno più quantitativo. Quest'ultimo aspetto rappresenta il valore aggiunto delle tecniche attive, la possibilità di effettuare prove specifiche in base all'ambito o all'oggetto. Vi è infatti la possibilità tramite intensità o tipologia di forzante

di evidenziare maggiormente discontinuità nel materiale. In base alla tipologia di forzante termica usata viene effettuata una classificazione riportata in figura 5, ognuna della quali ha specifici vantaggi e svantaggi.

Excitation Mechanisms	Source	Major Advantage	Major Limitations
Optical	Photographic Flashes	<ul style="list-style-type: none"> - Wide surface inspection; - High energy; - Short pulse (few ms); - More suitable for planar defects (e.g. corrosion). 	<ul style="list-style-type: none"> - Relatively expensive; - Non-uniform heating; - Limited practicality for some field applications.
	Halogen Lamps	<ul style="list-style-type: none"> - Fairly low cost; - Relatively low energy; - Wide surface inspection; - More suitable for planar defects (e.g. corrosion). 	<ul style="list-style-type: none"> - Long heating time (few seconds); - Limited practicality for some field applications.
	Laser	<ul style="list-style-type: none"> - More suitable for perpendicularly extended defects (e.g. cracks). 	<ul style="list-style-type: none"> - Spot inspection; - Longer inspection time than optical; - Non-uniform heating.
Inductive	Electro-magnetic Coils	<ul style="list-style-type: none"> - More suitable for surface and near-surface perpendicularly extended and fine defects (e.g. cracks). 	<ul style="list-style-type: none"> - Long time of inspection; - Inefficient for subsurface defects; - Non-uniform heating.
Vibro-thermography	Ultrasonic/sonic (Transducer)	<ul style="list-style-type: none"> - More suitable for hardly visible surface/near-surface defects (e.g. cracks) undetectable by other IRT methods. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited practicality of using mechanical excitation in some occasions.
	Microwave (Horn)	<ul style="list-style-type: none"> - Relative uniform heating; - Energy efficient. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited practicality of using microwave device in some occasions.
Others (Convection, Conduction, etc.)	Cooling (e.g. air/water cooler, fan, freezing spray, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Potentially low cost, - Less reflection - Relatively more practical than heating for the field applications 	<ul style="list-style-type: none"> - Lack of literature; - Lack of efficient cooling equipment; - Less control over heat waveform.
	Heating (e.g. heat gun, heat blanket, hot rod/coil, hot air, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Potentially low cost; 	<ul style="list-style-type: none"> - Lack of literature; - Lack of efficient heating equipment; - Less control over heat waveform.

Figura 5 Termografia attiva tipologie di fonte termica

All'interno delle singole tipologie, una classificazione molto utile ed importante direttamente relativa alla modalità di esecuzione delle prove si basa sulla posizione reciproca di camera e sorgente di eccitazione.

Si possono effettuare le ispezioni sia in modalità riflessione che in modalità trasmissione. Le due tipologie di schemi differiscono nella disposizione relativa di termocamera, fonte di eccitazione termica e oggetto in esame. Nel caso in cui il

campione è interposto tra le due strumentazioni si parla di trasmissione, nel caso in cui sorgente e ricevitore sono posizionate dallo stesso lato si parla di riflessione. Viene riportato lo schema modalità riflessione presente in [1]. Da notare la presenza in aggiunta al semplice schema dei contributi di emissione, riflessione e trasmissione presentati alla fine del paragrafo 1.1.

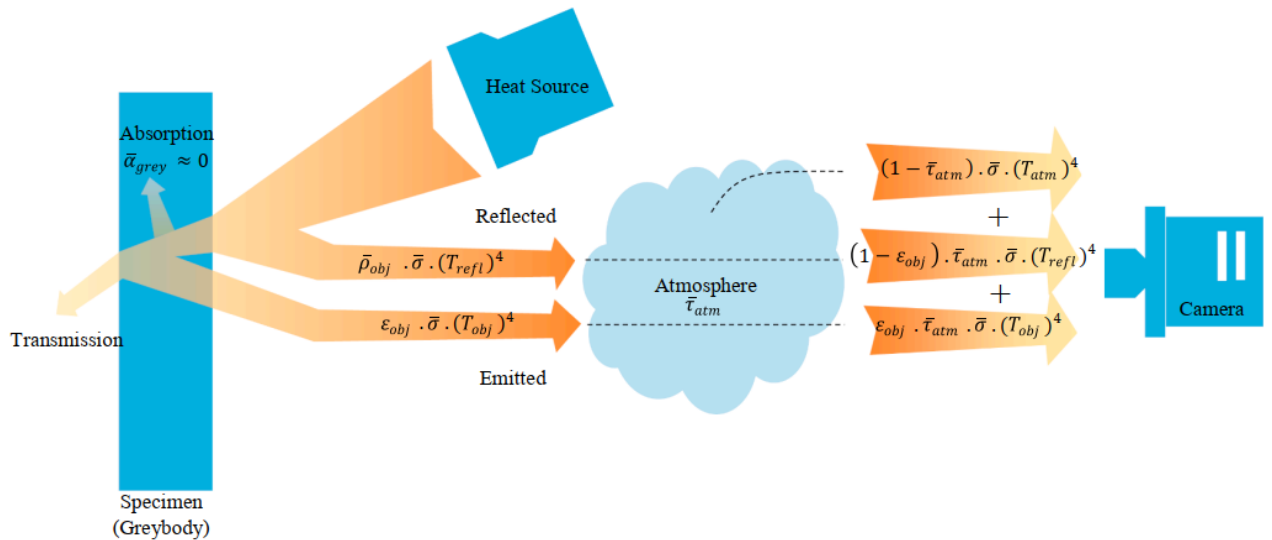


Figura 6 Schema in riflessione e contributi di emissione, riflessione e trasmissione al segnale

Si riporta per completezza anche lo schema di una prova eseguita in modalità in trasmissione, anche se non sarà utilizzata in seguito.

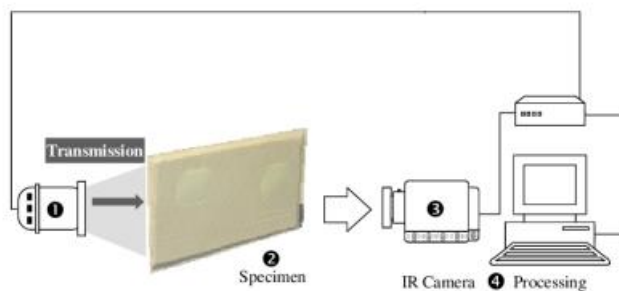
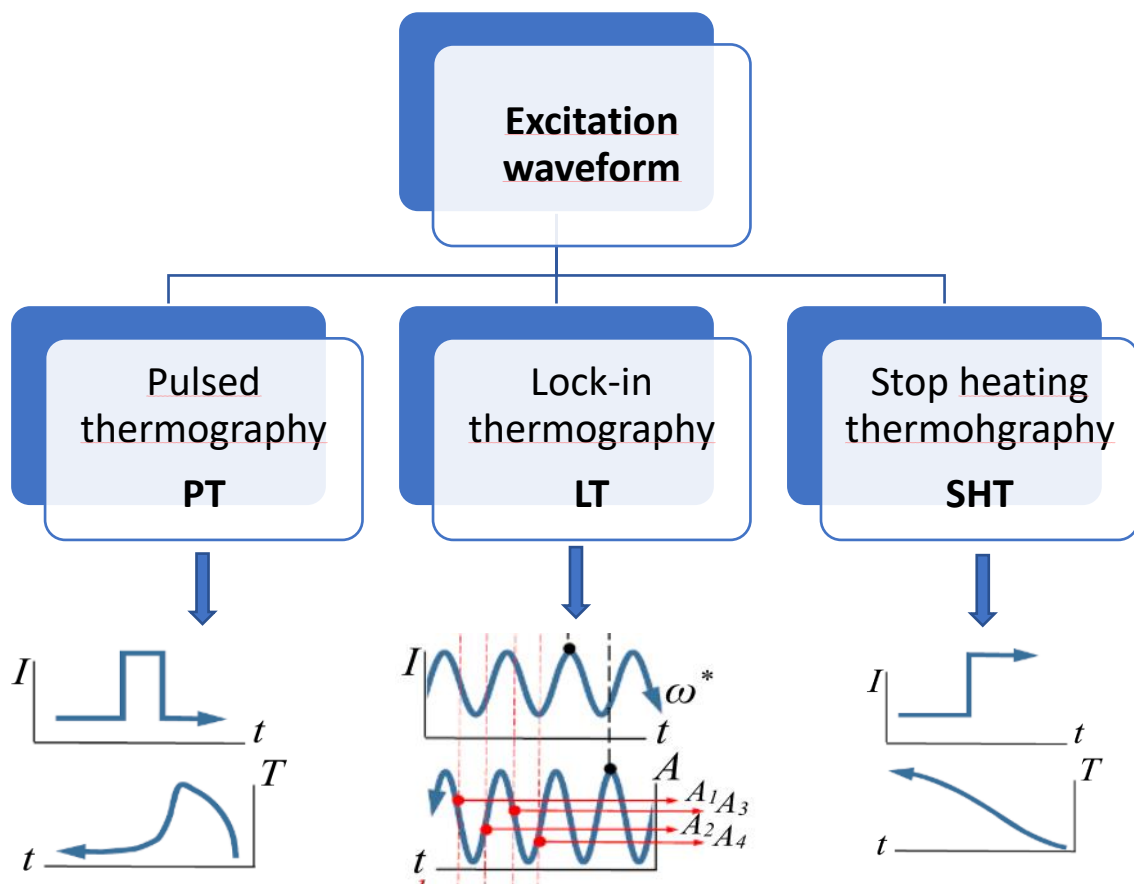


Figura 7 Schema prova in modalità trasmissione

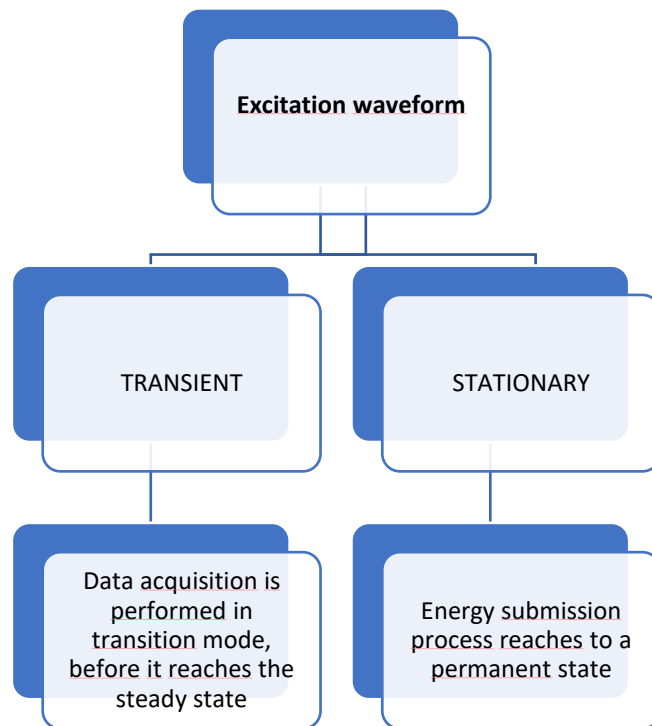
Nel caso studio oggetto della tesi si parlerà di termografia attiva di tipo ottico con fonte di eccitazione termica di tipo laser. La disposizione sul piano di prova dei componenti avverrà in modalità riflessione.

3.4.1 TERMOGRAFIA ATTIVA 'PULSED'

Esistono anche altre tecniche di termografia attiva in relazione all'acquisizione e processamento dei dati. Di rilevante importanza in tale operazione sono l'ampiezza, la frequenza e il tempo della forzante termica. In base al tipo di funzione imposta alla forzante termica, con relativa modifica dei parametri precedentemente elencati si possono individuare tre grandi categorie. Si parla di *pulsed thermography*, *lock-in thermography* e *stop heating thermography*. Nel seguito il diagramma a blocchi per schematizzare la classificazione.



L'acquisizione può avvenire in contemporanea o alla fine dell'eccitazione. Il diverso modo di operare in tal senso porta ad un'altra classificazione. Si riporta uno schema a blocchi per schematizzare la classificazione.



Il focus del paragrafo si soffermerà sulla tecnica 'pulsed' che sarà utilizzata nelle simulazioni e nei modelli sviluppati. Si tratta di una modalità di studio relativamente semplice che consiste nel somministrare un impulso di energia per un periodo molto breve nell'ordine dei millisecondi. Si analizza la variazione superficiale sia nella fase di riscaldamento che di raffreddamento.

3.5 FISICA DEL PROBLEMA

Il fenomeno fisico in gioco usando metodi di analisi termica è la conduzione. Considerando le varie tecniche termografiche utilizzabili possibili si deve passare dalla risoluzione dell'equazione del calore con determinate condizioni al bordo. La procedura ha come obiettivo ricavare l'evoluzione di temperatura nel tempo. Il punto di partenza è il modello classico di conduzione termica di Fourier riportato:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha * \nabla^2 T \quad (8)$$

Con i seguenti parametri

- $\alpha = k/\rho C$ diffusività termica [m²]
- T temperatura assoluta [K]

- K conducibilità termica [W/(mK)]
- ρ densità [kg/m³]
- C calore specifico [J/(kgK)]

Le importanti ipotesi alla base sono:

- Materiale omogeneo ed isotropo
- Condizione di adiabaticità.
- No generazione interna di calore
- Area della sezione perpendicolare alla direzione dello scambio termico

Come si può immaginare risulta molto difficile ricadere in queste assunzioni analizzando un caso reale.

3.5.1 MODELLI 1D EQUAZIONE DEL CALORE

Vista la complessità del problema analitico 3D si elaborano dei modelli partendo da una semplificazione di tipo 1D per meglio comprendere evoluzioni e comportamenti specifici.

L'equazione semplificata (9) è il punto di partenza di tutte le successive considerazioni.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

- z coordinata lungo lo spessore del materiale.

Naturalmente l'equazione (9) ha validità fino a che continuano a valere le ipotesi di approssimazione 1D. Nelle figure successive è possibile capire tale limite. Nel primo caso l'effetto di migrazione termica a causa del diverso spessore è limitato ad una porzione molto piccola del corpo. Nel caso di destra, invece, non è possibile trascurare le componenti del flusso rispetto alla direzione z.

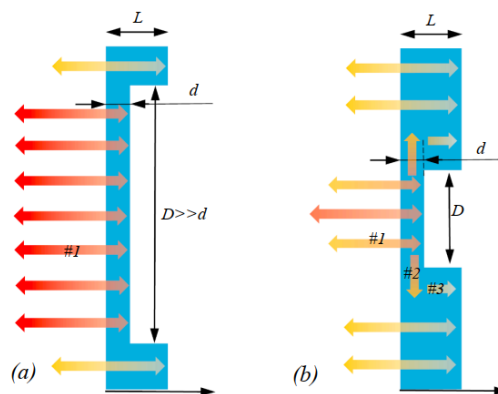


Figura 8 Scambio termico di tipo 1D (destra) o di tipo 3D (sinistra)

I successivi modelli analitici che saranno presentati derivano da studi legati alla corrosione. In maniera semplificata la corrosione può essere pensata come una variazione, seppur piccola, di spessore.

Il primo caso presente in letteratura è quello di una lastra di spessore seminfinito, $z \gg 0$.

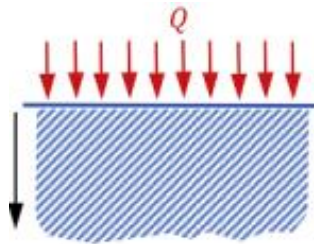


Figura 9 Modello di corpo seminfinito

Viene assunta una forzante uniformemente distribuita sulla superficie di tipo impulsivo modellata come delta di Dirac. In [6] viene proposta la soluzione analitica considerando un piano semi infinito con delta di Dirac $\frac{Q}{\rho * c}$ sulla superficie ($Z=0$). In funzione di z si ha l'evoluzione nel tempo della temperatura lungo lo spessore del corpo.

$$T_{s-inf}(z, t) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4\alpha t}\right) = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \Big|_{z=0} \quad (10)$$

- Con T_0 temperatura iniziale (temperatura ambiente);
- Condizione al bordo $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ per $z = 0$;
- $e = \sqrt{\rho * k * C}$ detta effusività termica.

Il risultato principale da un tale modello che prende in esame un materiale omogeneo ed opaco con le condizioni imposte elencate è la pendenza della curva di raffreddamento. Tale comportamento segue qualitativamente l'andamento $\frac{1}{\sqrt{t}}$. Se si osservano delle discrepanze si è in presenza di difetti superficiali, fisicamente della mancanza di materiale. Proprio la diversa quantità di materiale in gioco fa sì che cambi la velocità con cui il calore viene scambiato, in particolare si riduce il tasso di scambio.

Il naturale step successivo passa ad analizzare un modello con due dimensioni finite. Si parla di lastra con spessore L costante.

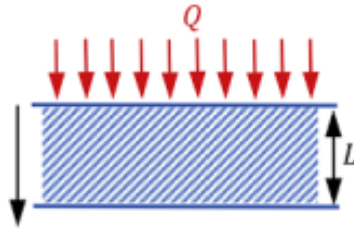


Figura 10 Modello lastra seminfinita a spessore finito

La forma analitica del problema è proposta in [7] e riportata.

$$T_{plate}(z, t)|_{z=0} = T_0 + \frac{Q}{\rho CL} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-n^2 \pi^2 F_0) \right] \quad (11)$$

$$F_0 = \frac{\alpha * t}{L^2} \text{ Fourier number}$$

Rispetto al caso precedente possiamo individuare una soluzione a regime nel caso in cui tutto lo spessore è stato raggiunto dal flusso termico. La parte fra parentesi graffe rappresenta la cumulata del calore all'interno della piastra (energia termica aumenta andando a diminuire il termine a destra). Si può ripetere la stessa procedura fatta al caso precedente per capire la mancanza di materiale questa volta prendendo in considerazione la effusività termica di un corpo con o senza assenza parziale di materiale. Si definisce un nuovo parametro, il coefficiente di riflessione termica:

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

Tenendo presente la perdita di scambio termico in assenza di materiale il valore tende ad avvicinarsi ad uno.

3.5.2 APPLICAZIONE A COMPONENTI CON SPESSORE VARIABILE

In questa sezione si passa a vedere le forme analitiche che hanno esplicitamente al loro interno la presenza di una variazione geometriche. La semplificazione adiabatica dei casi più semplici del paragrafo precedente rimane valida

3.5.2.1 Due piastre

In questa sezione si passa a vedere le forme analitiche che hanno esplicitamente al loro interno la presenza di una variazione geometrica. La cosa più semplice è rappresentata da un modello a due spessori semplificabile a due piastre affiancate. Si può valutare con

il modello piastra (11), precedentemente analizzato, la nuova condizione. Si evinceranno differenze una volta che lo spessore inferiore è stato completamente investito dal flusso termico.

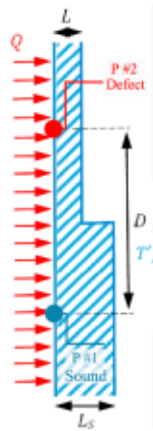
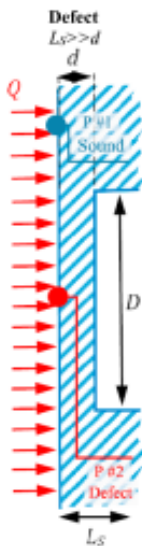


Figura 11 Modello geometrico lastra a due spessori

3.5.2.2 Difetto centrale

Un altro possibile modello di riduzione di materiale prende in considerazione una geometria assialsimmetrica dello stesso. Implementa rispetto al caso precedente l'effetto di bordo del cambio di geometria considerando gli effetti della diffusione termica laterale. Viene riportata la forma analitica proposta in [17].



$$T_{def}(z, t)|_{z=0} = T_0 + \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^n \exp\left(-n^2 \frac{d^2}{\alpha t}\right) \right] \left(1 - \exp\left(-\frac{(D/2)^2}{4\alpha t}\right) \right) \quad (12)$$

Figura 12 Modello lastra con foro centrale

Si osserva la sovrapposizione degli effetti del diverso spessore del materiale e della forma del difetto con dimensione principale D.

Le analisi numeriche derivanti da tali modelli presentati in questa fase sono il punto di partenza delle elaborazioni sviluppate e vengono riportate nel capitolo Elaborazioni e Analisi

3.6 PROBLEMA INVERSO

Fino a questo punto si è parlato di definire l'evoluzione di temperatura noti geometria e forzanti. L'obiettivo solitamente è opposto, dal segnale di temperatura opportunamente esaminato ricavare informazioni utili nel comprendere la geometria da cui proviene il segnale.

Possiamo far riferimento al problema inverso cioè legare l'anomalia di temperatura ad anomalie relative alla geometria del corpo esaminato. In genere dal punto di vista analitico si va a confrontare il modello 1D con le varianti che tengono conto dell'effetto della distribuzione tridimensionale del calore. È proprio questa la procedura usata per le applicazioni in ambito meccanico con l'obiettivo di identificare difetti, corrosione, usura da fatica. Dal punto di vista analitico il problema inverso si risolve facendo riferimento alla 'thermal contrast' ovvero la seguente equazione:

$$\Delta L/L = \frac{\Delta T/T}{1 + \Delta T/T} \approx 1 - T_{sound}/T_{defect} \quad (13)$$

La variazione di spessore è messa in relazione alla variazione di temperatura registrata sull'area con difetto con quella di riferimento.

3.7 MODELLI FEM IN LETTERATURA

Il problema della termografia attiva può essere trattato con modelli agli elementi finiti sia per uno studio più di dettaglio sia per un guadagno di tempo viste le lunghe procedure per il set up delle prove sperimentali usate in questo lavoro (Vedi capitolo Materiali e Metodi).

In letteratura sono presenti pochi studi che trattano modelli agli elementi finiti per studiare problemi di termografia attiva essendo una tecnica sperimentale. Nel prosieguo del paragrafo riportiamo le informazioni più interessanti usate su altri studi per la costruzione di un modello fem. L'obiettivo è quello di stimare l'evoluzione di temperatura di un elemento sottoposto ad una forzante termica.

In generale nel calcolo della distribuzione spaziale della temperatura si analizzano tre aspetti:

- Geometria del problema
- Proprietà termofisiche del materiale
- Condizioni iniziali ed al contorno

Nello studio di questo lavoro viene considerato un elemento con geometria caratterizzata da diversi spessori. A tale dominio vengono associate le proprietà termofisiche di conduttività termica, calore specifico e densità. Le condizioni al contorno variano in base alla tecnica utilizzata. Solitamente viene imposto un flusso termico sulla zona riscaldata e imposto flusso nullo sulle altre. Come esempio riportiamo la figura 13 presente in [15]

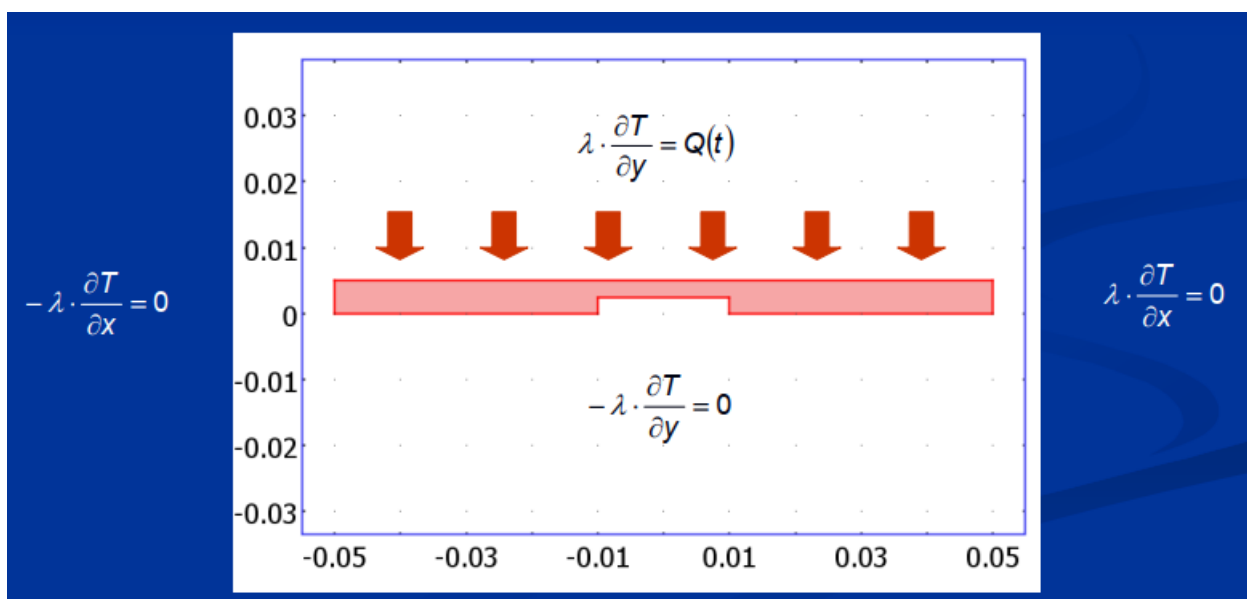


Figura 13 Inserimento condizioni al bordo Fem

Il punto cruciale di una analisi agli elementi finiti è la mesh. Solitamente se si usa un software di tipo commerciale per la risoluzione numerica questo elabora in automatico una mesh che prevede un infittimento degli elementi in funzione della geometria. Si riporta la mesh proposta da un calcolatore commerciale per la geometria di figura 14.



Figura 14 Mesh creata da solutore commerciale

Si nota come nelle aree ritenute critiche come gli angoli o le variazioni di spessore vi sia un notevole infittimento della trama. Altro punto a sfavore sono gli elementi di tipo triangolare che generano una distribuzione irregolare della temperatura. Questa

costruzione è dovuta al fatto che il parametro che il modellatore fem segue si basa sul numero di elementi presupponendo che l'intero corpo venga coinvolto nel riscaldamento. Nella realtà la condizione imposta come forzante termica ha uno sviluppo molto veloce sia nella somministrazione del calore che nella seguente fase di raffreddamento. Si parla rispettivamente di qualche decina di millisecondi e qualche secondo. Il volume interessato si riduce alla sola fascia superficiale. Per esempio, in caso di provino in acciaio sottoposto a riscaldamento per 15 ms, il fronte termico penetra per solo 1 mm. Per meglio comprendere viene riportata la figura 15 dove la faccia superiore è stata sottoposta a forzante uniforme.

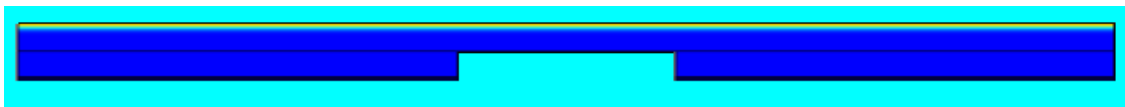


Figura 15 Penetrazione calore dopo 15 ms

Si nota come la parte termicamente alterata non raggiunga il punto in cui si 'sente' la differenza di geometria. Dal punto di vista numerico questo comporta l'uniformità di temperatura a parità di profondità. Come dimostrato in [15] con la generazione automatica della mesh si va contro a questa considerazione fisica.

Nasce, quindi, la necessità di studiare con elevato grado di dettaglio proprio lo strato sub-superficiale.

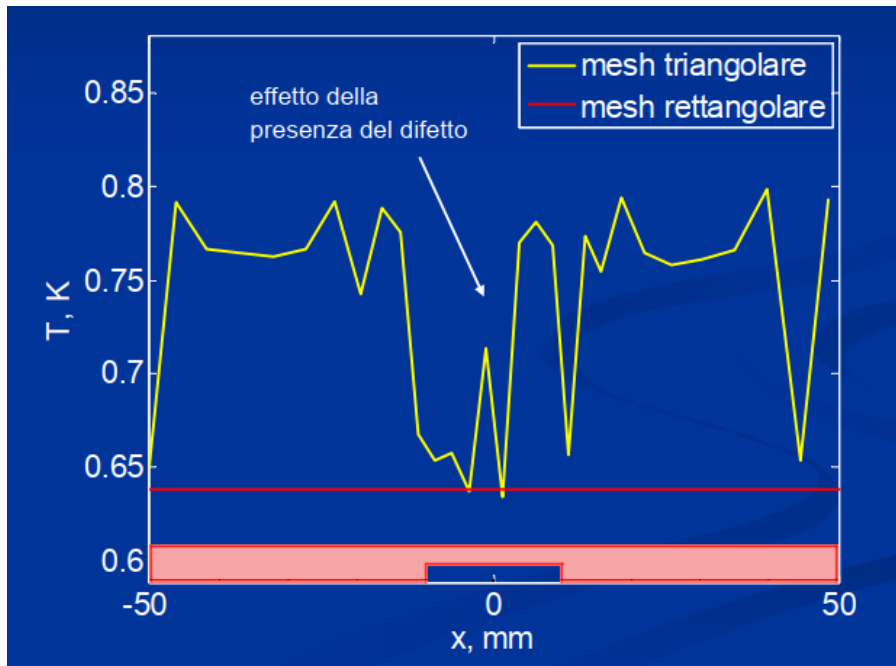


Figura 16 Confronto mesh elementi triangolari e quadrangolari

Quanto descritto porta alle modifiche della mesh come riportato in figura 17.



Figura 17 Mesh con soli elementi rettangolari

Ricapitolando i punti cruciali per una corretta impostazione di simulazione ricavati dalla letteratura:

- Impostazione delle condizioni al bordo
- Mesh con elementi quadrangolari
- Elementi con variazione dello spessore in funzione della profondità

In questo elaborato si è scelto il solutore commerciale agli elementi finiti Ansys.

4 MATERIALI E METODI

Nel presente capitolo sono descritti la strumentazione ed i materiali utilizzati per le analisi sperimentali. Alcune delle informazioni che verranno riportate sono state solamente accennate nella parte relativa allo stato dell'arte mentre in questa fase si entrerà più in dettaglio. Prima di considerare e analizzare specificatamente il materiale del lavoro di tesi si procede ad una descrizione generale della strumentazione utilizzata per indagini con tecniche termografiche in modo da fornire uno sguardo più ampio sulla metodologia. Nel passo successivo si entra nello specifico della strumentazione presente presso il Politecnico di Torino per poi descrivere preparazione e set-up delle prove effettuate.

In [8] è presente il seguente schema generale riportato in figura 18. Vengono evidenziati schematicamente tutti gli strumenti necessari all'analisi con tecniche di termografia di tipo attivo.

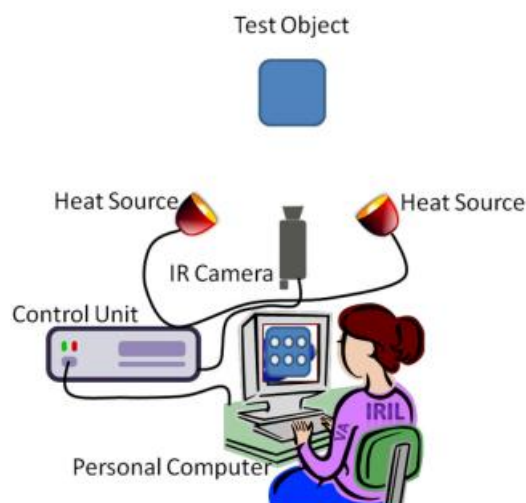


Figura 18 Schema strumentazione termografia attiva

I componenti impiegati in questo tipo di indagine possono variare in funzione del tipo di tecnica che si vuole utilizzare. Imprescindibile è la termocamera ad infrarossi (IR) sia in logiche di tipo attivo che passivo. L'obiettivo della termocamera è la rilevazione della temperatura del campione in esame. La scelta di tale strumento varia in base a tanti fattori, da quello economico, risorse da investire, a quello applicativo. La fonte di eccitazione invece è presente solo in logiche di tipo attivo dove vi è la necessità di scaldare in maniera specifica il componente. Si utilizzano lampade alogene, flash, induttori e laser. Tutte queste diverse fonti di eccitazione termica permettono profili di

riscaldamento dalle molteplici caratteristiche, dalla delta di Dirac a profili di carico sinusoidale. Per far dialogare tra di loro i componenti è indispensabile la presenza di una unità di controllo. Permette di gestire le informazioni durante la prova sperimentale, dalla lunghezza prova ai frame rate ai pixel oggetto di indagine. Per poter elaborare tali dati è necessario un software di analisi dedicato solitamente presente su un elaboratore fisso in postazione o computer personale in base ad esigenze e difficoltà delle prove. L'efficienza del processamento delle informazioni e la successiva elaborazione sono di fondamentale importanza non solo per la riduzione dei tempi ma anche per la qualità dei dati di output forniti. Quest'ultimi aspetti hanno molto peso nelle analisi poiché solitamente per lo studio dello stesso fenomeno in ambito sperimentale vengono effettuate molte prove ed i dati riprocessati con altri software. Fatta questa generale premessa si specifica quanto riportato al caso studio.

La strumentazione e i provini utilizzati al Politecnico vengono dettagliati nel seguente ordine. Nel primo paragrafo si analizzano i componenti fisici necessari alle prove mediante termografia attiva, stazione di prova con termocamera, eccitazione termica e strumentazione di elaborazione e relativo software. Nel seguito vengono riportati i provini analizzati ed i valori di set utilizzati. L'estrazione e valutazione dei dati numerici avverrà nel capitolo successivo.

4.1 STRUMENTAZIONE

La strumentazione descritta è presente al Politecnico di Torino presso il dipartimento di ingegneria meccanica ed aerospaziale (DIMEAS) nell'ambito di una più ampia ricerca sulle tecniche di termografia attiva. Il macchinario è realizzato dalla DES ('diagnostic engineering solutions') ed applicato per realizzare prove mediante tecnica di termografia attiva di tipo 'pulsed' (PPT). Il sistema multides system laser specifico per tali scopi si basa su un approccio di tipo modulare. Comprende, infatti, la possibilità di variare la fonte termica necessaria al riscaldamento (si possono inserire lampade alogene, lampade flash, laser, ultrasuoni, microonde).

Nel caso in esame si lavora con un laser. Si riporta in figura 19, fornita dalla DES stessa [9], una rappresentazione schematica della strumentazione impiegata.

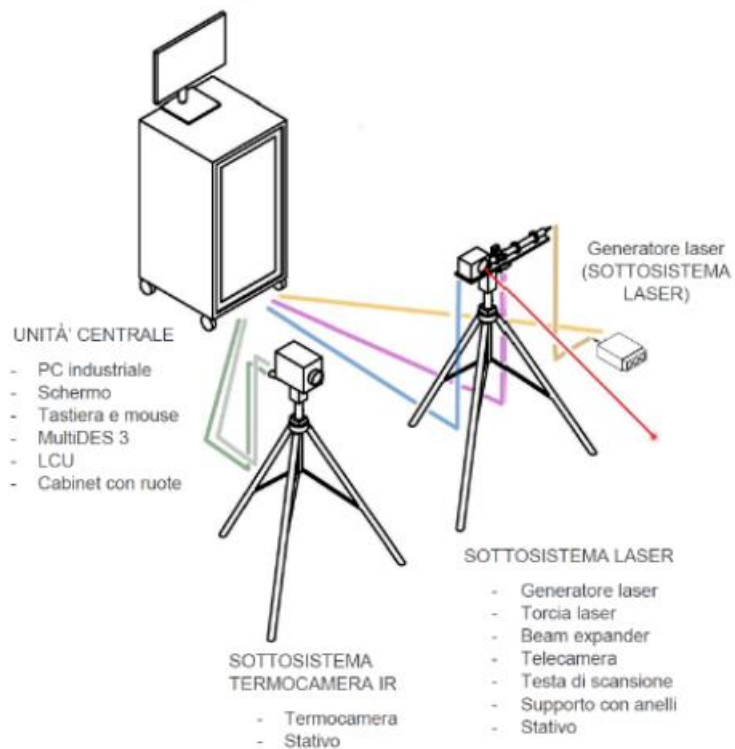


Figura 19 Schema strumentazione laboratorio Politecnico

Nel dettaglio il sistema è composto:

- Termocamera FLIR A6751sx
- Modulo laser
- Centralina di controllo DES
- Software RESEARCH (proprietà di FLIR) per la gestione della termocamera
- Software MultiDES (proprietà di DES) per il set-up dei parametri di prova
- Software IRTA (proprietà DES) per l'estrazione dei dati sperimentali

Gli strumenti sono forniti separatamente ma assemblati su una struttura con delle protezioni per lavorare in completa sicurezza essendo in presenza di sorgente laser. L'obbligo di avere tale dispositivo di protezione non permette l'uso 'reale time' tipico di altre tecniche ma per ora è limitato ad analisi in laboratorio.

Si riporta in figura 20 il banco prova completo presente in dipartimento



Figura 20 Banco prova completo laboratorio

Si procede con l'analisi dettagliata dei singoli componenti costituenti la strumentazione del laboratorio in modo da capirne utilizzo e potenzialità.

4.1.1 TERMOCAMERA

La termocamera rappresenta il fulcro di tutto l'apparato essendo lo strumento attraverso il quale si rileva la temperatura del corpo o dell'area di interesse. Il segnale di evoluzione temporale di temperatura è il principale output su cui si baseranno tutte le operazioni successive. Il corretto settaggio di tale strumento sarà, quindi, fondamentale per il prosieguo.

La termocamera utilizzata è la FLIR A6751sx con una risoluzione di 640x512 pixel campionati ad una frequenza di 125 Hz. Viene riportata l'immagine da catalogo [10]



Figura 21 Telecamera Flir A6751sx

Vengono sintetizzate nella seguente tabella le principali caratteristiche estratte da catalogo [10]

Tabella 1 Caratteristiche termocamera Flir

Rilevatore	Cooled Indium Antimonide (InSb)
Intervallo spettrale	1,5 ÷ 5,1 μm
Pitch	15 μm
Thermal Sensitivity	< 25 mK (18 mK typical)
Intervallo standard di temperatura	5°C ÷ 300°C
Accuratezza	$\pm 1^\circ\text{C}$ oppure $\pm 1\%$ del valore letto
Campo di vista con lente	11°x8,8°
Integration Time	160 ns ÷ 20000 μs
Frame rate (full frame)	125 Hz
Dimensione immagine max (full frame)	640x512 pixel
Frame rate max (subwindow)	4011 Hz
Dimensione subwindow (per frame rate max)	64x8 pixel
Image data	14 bit

La gestione della termocamera avviene tramite il software ResearchIR della FLIR. È possibile settare vari parametri come la finestra di temperatura, la risoluzione della termocamera e frame rate di acquisizione delle immagini. In particolare, viene data la possibilità di ridurre la risoluzione delle immagini acquisite e aumentare la frequenza di campionamento. Il valore massimo relativamente al frame rate è pari a 735 Hz, corrispondente ad un tempo di campionamento di 1,3 ms. Una volta settati i dati si procede al test riponendo particolare attenzione all'aspetto sicurezza. Vigè l'obbligo di

chiudere le barriere che circondano la strumentazione prima di attivare il processo di riscaldamento. L'utilizzo di un software specifico permette un inserimento semplice e veloce dei parametri di interesse. I principali parametri richiesti dal software sono: emissività del materiale, la distanza tra emettitore e ricevitore, la temperatura e l'umidità dell'ambiente di prova. Se la rilevazione di temperatura e umidità non riveste specifiche difficoltà di contro necessitano particolari accorgimenti l'emissività insieme alla temperatura riflessa apparente. Per la loro importanza nell'applicazione della termografia attiva come prova non distruttiva vi è la norma BS ISO 18434-1:2008 che definisce le operazioni preliminari ed il calcolo. Un errore in tali parametri influenza fortemente l'output delle prove (Nel capitolo successivo, errore settaggio emissività). Per una analisi approfondita nel set sperimentale ed estrazione e calcolo dei parametri si rimanda al lavoro di tesi [13] effettuato sempre presso lo stesso laboratorio del Politecnico.

Per poter effettuare in maniera stabile e ripetibile le misurazioni, lo strumento viene posizionata su una apposita struttura che ne permette l'orientazione ed il mantenimento in posizione. Come mostrato in figura 22.



Figura 22 Termocamera con relativo sistema di fissaggio

L'output fornito da ResearchIR consiste in un termogramma come mostrato in figura 23.

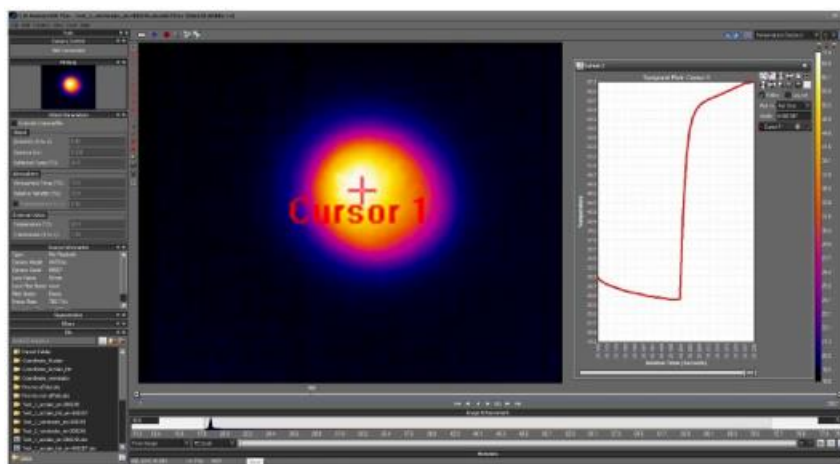


Figura 23 Schermata di analisi de termogramma mediante ResearchIR

Oltre ad una prima valutazione grafica è possibile registrare e rielaborare le informazioni acquisite per effettuare delle analisi specifiche. Quest'ultima sarà il modo di procedere nel prossimo capitolo relativo alle analisi numeriche.

4.1.2 LASER

La fonte di eccitazione termica nell'apparecchiatura è un laser ottico, 'Pulsed ytterbium fiber laser' (laser in fibra basato sull'itterbio) con relativa centralina elettronica LCU, 'laser control unit'. Tale elemento rappresenta lo strumento indispensabile per effettuare prove di termografia ottica, non è presente in analisi 'real time' di tipo passivo. È composto dalla sorgente di calore e dalla testa di scansione che permette lo spostamento del fascio al fine di illuminare la zona di interesse. La gestione del laser avviene tramite interfaccia dedicata MultiDes di proprietà Des. Il laser in dotazione permette di realizzare profili di riscaldamento assimilabili ad onde quadre.

Si riportano in tabella le caratteristiche presenti nel relativo catalogo DES [12]

Tabella 2 Caratteristiche da catalogo Laser

<i>Laser in fibra</i>	
Modello	YLP-V2-1-100-30-30
Potenza massima nominale	30 W
Dimensione del fascio	6 ÷ 9 mm
<i>Centralina elettronica LCU</i>	
Forma d'onda	impulso singolo / treno di impulsi
Ripetizioni	1 ÷ 65025
Durata dell'impulso	5 ms ÷ 10000 s (step 1 ms)
Modulazione di potenza	11 ÷ 100% (step 1%)

Si possono realizzare vari profili di carico cambiando il set up dei parametri in input, in particolare

- Il periodo dell'impulso dell'onda quadra
- Il numero di impulsi in caso di riscaldamenti multipli
- La percentuale di potenza rispetto alla condizione di potenza massima

Particolare attenzione è da porre alle procedure corrette prima dello start del raggio laser per questioni di sicurezza, nonostante le potenze in gioco non siano elevate. È fondamentale isolare tutti gli apparati del laboratorio mediante una tenda normata specifica per applicazioni in cui vengono usate sorgenti laser

Per le operazioni complete per il settaggio del laser si fa riferimento al lavoro di Tesi di [11]

4.1.3 SOFTWARE ANALISI TERMOGRAMMA

Accanto alla parte hardware particolare interesse è da dare al software dedicato all'elaborazione dei dati registrati dalla termocamera. Come descritto nel paragrafo precedente la termocamera fornisce tramite la sua piattaforma un semplice output, per ricavare tutte le informazioni utili per la comprensione dei fenomeni in gioco non è sufficiente. Il tool presente in laboratorio che permette di acquisire ed elaborare il termogramma in output si chiama Irta ed è sviluppato dalla DES. La funzione più utilizzata per le analisi effettuate è lo 'Spot Track' ovvero la rappresentazione dell'andamento di temperatura di un pixel durante la prova. I pixel vengono inseriti direttamente sull'immagine del termogramma. Si può vedere l'interfaccia base del software presente a video in figura 24.

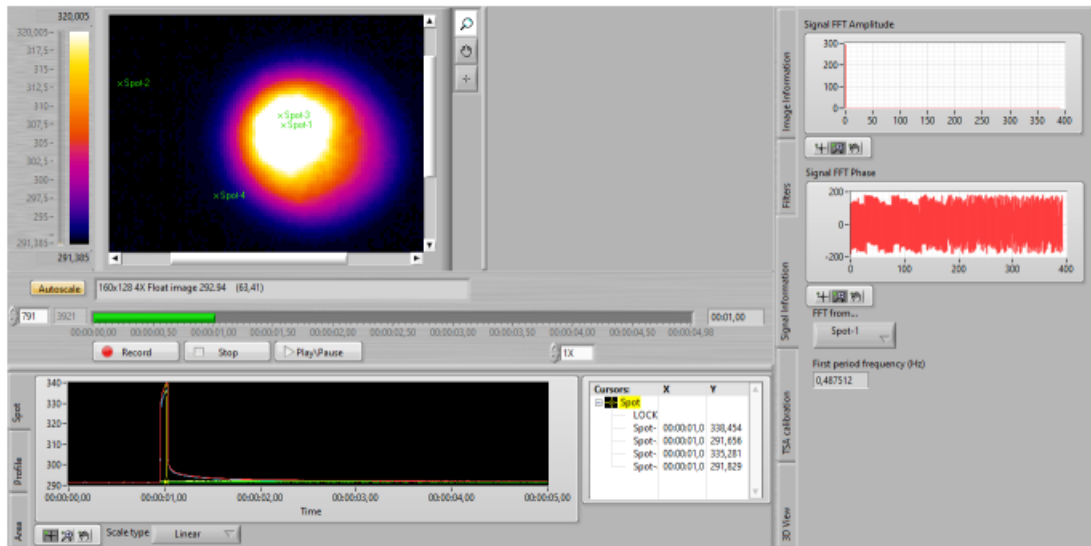


Figura 24 Interfaccia irta con termogramma e dello spot track

È anche possibile in automatico evidenziare informazioni relative al dominio in frequenza relative ai pixel considerati. Funzione molto utile nel lavoro oggetto di questa tesi in cui si fa riferimento a termografia attiva di tipo 'pulsed'. Dagli andamenti di modulo e fase è infatti possibile capire se le condizioni di risposta libera o meno siano verificate. Accanto alla velocità di visualizzazione delle informazioni il vero vantaggio nell'uso di tale piattaforma dedicata è rappresentato dalla possibilità di esportare all'esterno tutta questa mole di dati mediante file excel rendendo possibile una rielaborazione dei dati più personalizzata. Nel caso studio Irta è stata affiancata da Matlab. L'uso specifico fatto di Irta e relative interfacce sono esaminate nel dettaglio in [11]

4.2 PROVE SPERIMENTALI

In questo paragrafo si riportano la descrizione e le prove effettuate sui provini che vengono denominati 'scaletta' per le loro particolare forma che ricorda una scala con i suoi gradini. In particolare, i provini oggetto di studio hanno la medesima forma e dimensione ma diverso materiale: acciaio e alluminio. In una prima fase le prove sono state effettuate su provini senza trattamenti o ricoperture per poi ripetere le stesse procedure su campioni verniciati con vernice di colore nero. I 'gradini' scelti per l'analisi sono stati quelli a spessore 2,5 mm e 10,04 mm. Per migliore comprensione si riporta il disegno in figura 25.

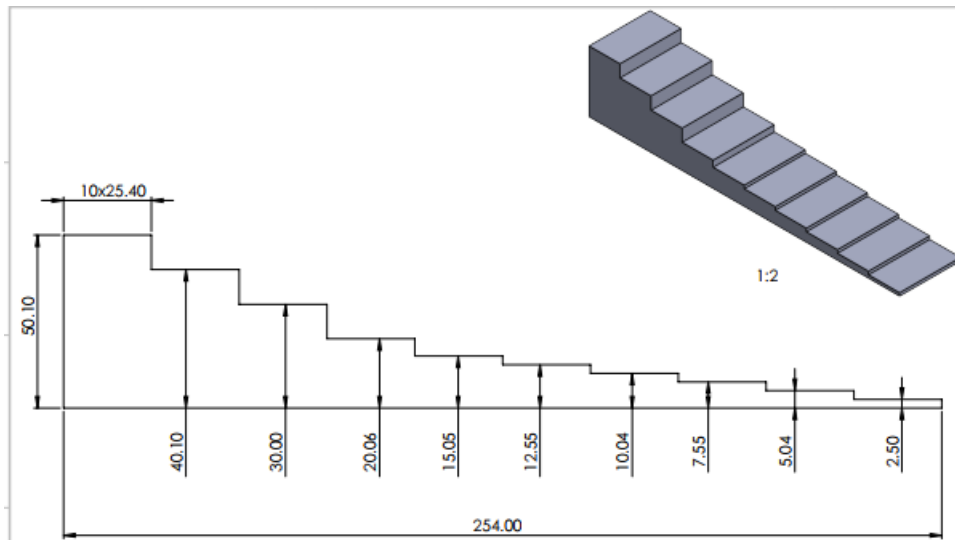


Figura 25 Vista in sezione ed assometrica della 'scaletta'

Ogni prova effettuata comporta un riscaldamento puntuale e quasi istantaneo della parte di provino interessata, nell'ordine dei millisecondi. Idealmente può essere vista come un' onda quadra come riportato nel grafico di figura 26.



Figura 26 Modello di forzante usato nelle prove

La fonte di eccitazione termica è il laser avente potenza massima di 50 W scalabile in percentuale con step dell'1%. L'analisi viene effettuata in modalità riflessione con termocamera infrarossi e laser posti dalla stessa parte rispetto alla scaletta poggiata su specifici supporti in legno ad una distanza di 0,5 m. I supporti devono influenzare in maniera trascurabile l'evoluzione dello scambio termico. La registrazione del termogramma parte dalla condizione non eccitata per seguire sia la veloce fase di riscaldamento che il successivo transitorio di raffreddamento. La finestra di acquisizione della camera IR relativamente alla temperatura è stata impostata a 10-90°. Il tempo totale di registrazione è stato definito 10 s. Questi ultimi parametri riportati provengono

dalla letteratura e dall'esperienza sviluppata in precedenti lavori sperimentali con la stessa strumentazione. In particolare [13]. Specifica attenzione è stata posta nella definizione dell'Emissività, il parametro chiave per la corretta estrazione dei dati numerici.

Si riporta lo schema logico con cui vengono effettuate le prove

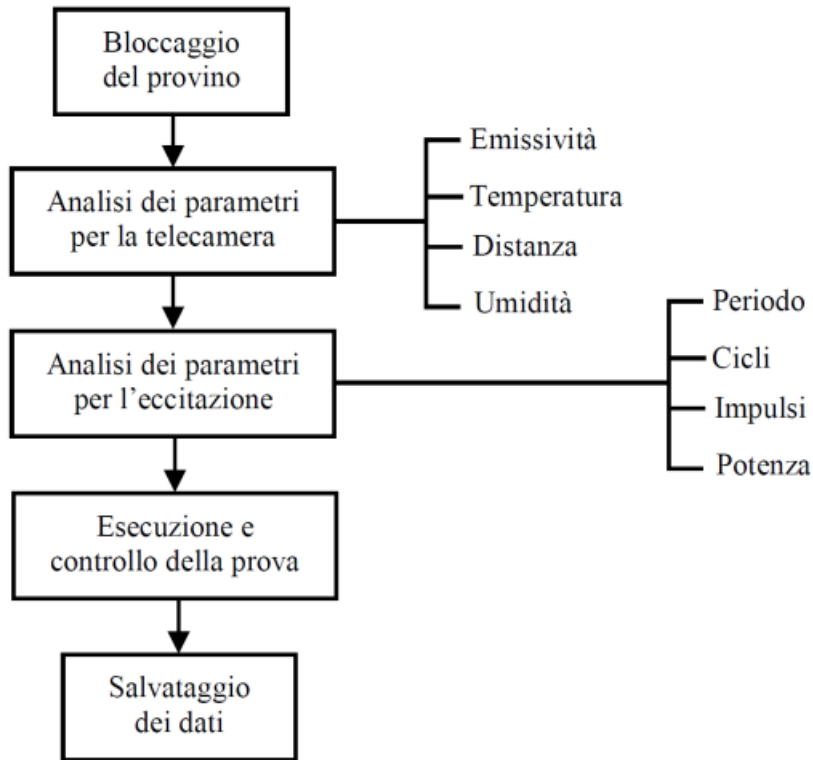


Figura 27 Schema logico di esecuzione delle prove

Vengono presentati schematicamente i set-up dei provini in due gruppi differenti in base al materiale.

4.2.1 PROVINI ACCIAIO

Le caratteristiche del materiale vengono riportate nel Capitolo Elaborazioni ed Analisi dati.

Per ogni spessore sono state effettuate due replicazioni per un totale di quattro test. Si riportano nella seguente tabella i vari parametri calcolati o derivanti da esperienza pregressa e settati per laser e telecamera IR.

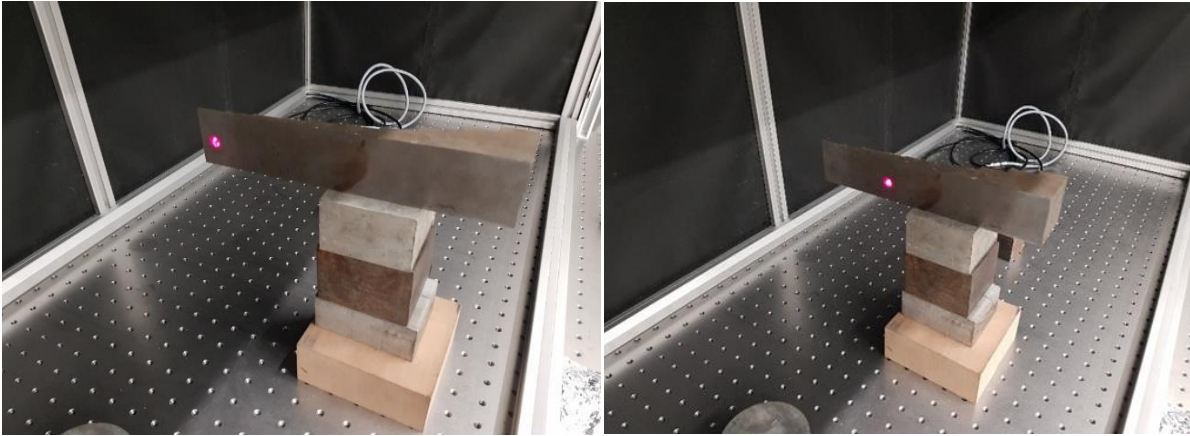


Figura 28 Provini in alluminio non verniciato

Tabella 3 Riepilogo dati set up per laser e termocamera

	Periodo [ms]	% laser	Impulsi	Frame rate [Hz]	tempo acquisizione totale [s]	Spessore [mm]	Emissività	Trifl [°C]	Tamb [°C]	Umid %
Test_1	50	80	1	600	10	2,5	0,5	21,7	21,8	13
Test_2	50	80	1	600	10	2,5	0,5	21,7	21,8	13
Test_3	50	80	1	600	10	10,04	0,5	22,2	22,2	12
Test_4	50	80	1	600	10	10,04	0,5	22,2	22,2	12

Si riportano le stesse informazioni per la scaletta in acciaio verniciata. La presenza del rivestimento superficiale modifica in maniera sostanziale il fenomeno dello scambio termico. Si evidenzia dal radicale cambio di emissività influenzato anche dal colore scelto, nero, per l'analisi. Si riportano nella seguente tabella i vari parametri calcolati o derivanti da esperienza pregressa e settati per laser e telecamera IR.

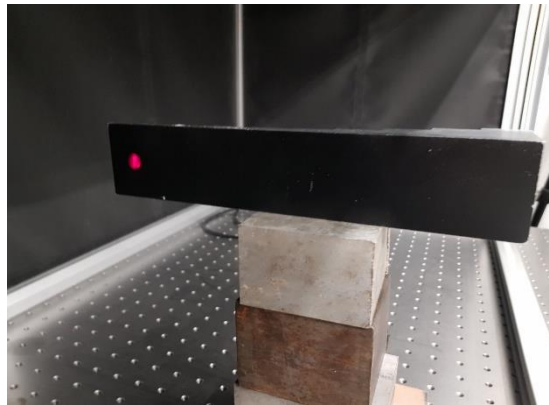


Figura 29 Provino in acciaio verniciato

Tabella 4 Riepilogo dati di set up provino in acciaio verniciato

	Periodo [ms]	% laser	Impulsi	Power rate [W]	tempo acquisizione totale [s]	Spessore [mm]	Emissività	Trifl [°C]	Tamb [°C]	Umid %
Test_1	5	50	1	600	10	2,5	0,99	22,6	22,7	11
Test_2	5	50	1	600	10	2,5	0,99	22,6	22,7	11
Test_3	5	50	1	600	10	10,04	0,99	22,7	22,8	11
Test_4	5	50	1	600	10	10,04	0,99	22,7	22,8	11

Si nota come siano stati modificati i settaggi del laser con diminuzione di potenza e periodo della forzante in base a quanto presente in letteratura nel caso di coating. Le elaborazioni numeriche verranno esposte nel capitolo Elaborazioni e Analisi Dati.

4.2.2 PROVINI ALLUMINIO

Le caratteristiche del materiale vengono riportate in fondo all'elaborato.

La disposizione dei provini sul banco prova è replicata rispetto al caso in acciaio

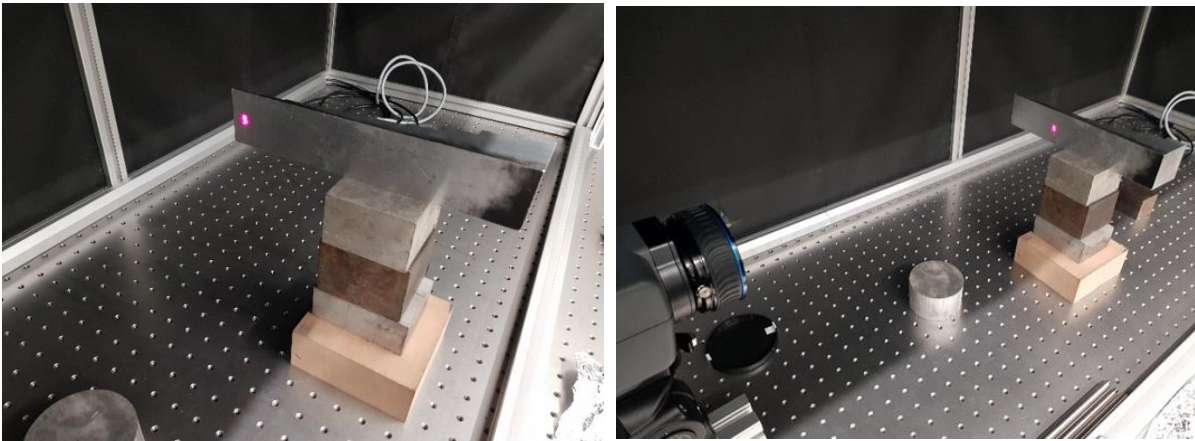


Figura 30 Provini in acciaio non verniciato

Per ogni spessore sono state effettuate due replicazioni per un totale di quattro test. Si riportano nella seguente tabella i vari parametri calcolati o derivanti da esperienza pregressa e settati per laser e telecamera IR.

Tabella 5 Dati set up e settaggi laser provini in alluminio non verniciato

	Periodo [ms]	% laser	Impulsi	Power rate [W]	tempo acquisizione totale [s]	Spessore [mm]	Emissività	Trifl [°C]	Tamb [°C]	Umid %
Test_1	50	80	1	600	10	2,5	0,45	22,4	22,5	11
Test_2	50	80	1	600	10	2,5	0,45	22,4	22,5	11
Test_3	50	80	1	600	10	10,04	0,45	22,6	22,5	11
Test_4	50	80	1	600	10	10,04	0,45	22,6	22,5	12

Lavorando con alluminio si è reso necessario un aumento della potenza del laser essendo in presenza di un ottimo conduttore di calore. Non si riuscirebbe in caso contrario a riscaldare in maniera sufficiente l'area dello spot laser. Considerando l'emissività ci si trova con valori dello stesso ordine di grandezza solo leggermente inferiori.

Esaminando lo stesso provino verniciato valgono le stesse considerazioni del caso in acciaio. Per completezza riportiamo la tabella di set up.

Tabella 6 Dati set up e settaggi laser provini in alluminio verniciato

	Periodo [ms]	% laser	Impulsi	Pulse rate [Hz]	tempo acquisizione totale [s]	Spessore [mm]	Emissività	Trifl [°C]	Tamb [°C]	Umid %
Test_1	5	50	1	600	10	2,5	0,99	20,8	21,3	14
Test_2	5	50	1	600	10	2,5	0,99	20,8	21,3	14
Test_3	5	50	1	600	10	10,04	0,99	21,4	21,3	14
Test_4	5	50	1	600	10	10,04	0,99	21,5	21,3	14

3 ELABORAZIONI E ANALISI DATI

Nel presente capitolo si descriveranno le elaborazioni e le successive analisi dei dati che ne scaturiscono. Si parte definendo la procedura e la logica utilizzate per lo scopo. L'obiettivo è rappresentato dal ricavare un match tra i risultati ottenuti a livello sperimentale, tramite tecnica di termografia di tipo attivo 'pulsed', e simulazioni analitiche e numeriche presenti in letteratura o sviluppate appositamente.

Nella logica di sviluppo del lavoro si è proceduto parallelamente tra le elaborazioni sperimentali e numeriche. Nella presente parte la successione delle informazioni avverrà nell'ordine con cui sono state ricavate e trattate. Si provvederà ad operare specifiche considerazioni mettendo in relazione i vari modelli.

Si riporta un flow-chart per riassumere sinteticamente l'impostazione operativa.

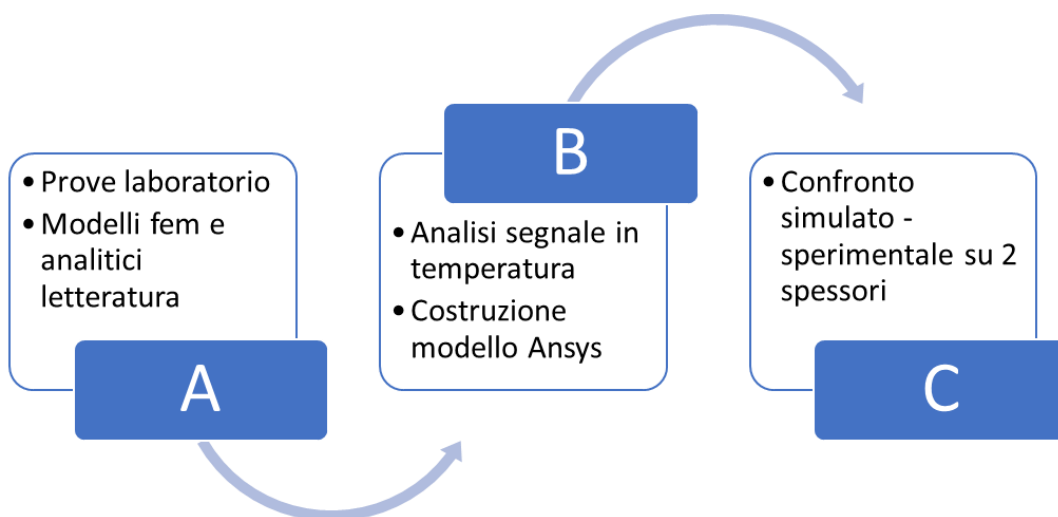


Figura 31 Flow Chart del lavoro di Tesi

La parte A comprende la ricerca in letteratura di tutto il materiale necessario prima a capire le basi della termografia attiva per poi focalizzarsi sulla tecnica 'pulsed', applicabile con la strumentazione del laboratorio. La tematica è stata trattata nel capitolo relativo allo Stato dell'Arte. Una volta completata questa parte di apprendimento è possibile passare all'elaborazione delle prove sperimentali e alla costruzione di modelli fem per capire il comportamento del modello scaletta ed operare i dovuti confronti. Il blocco indicato con B sarà l'oggetto su cui verterà il presente capitolo.

4.3 MODELLI ANALITICI

Le possibili soluzioni in forma chiusa dell'equazione di Fourier utili alla causa sono state elencate nel capitolo relativo allo Stato dell'Arte. In questa circostanza vengono esplicitate inserendo dei valori numerici plausibili in modo da renderle utilizzabili per valutazioni e confronti. Riportiamo gli estratti, tabelle e grafici, utili dallo script matlab usato per tale scopo. Si tratta sempre di soluzioni in forma chiusa con approssimazione 1D. La forzante termica Q viene inserita sotto forma di energia e imposta uguale per tutte le successive soluzioni riportate. Viene considerata di natura impulsiva (delta di Dirac) e uniformemente distribuita sulla superficie.

$$Q = 10 \frac{MJ}{m^2}$$

4.3.1 Modello di corpo semi infinito

Il modello a cui si fa riferimento è quello riportato in figura 9. Vengono riportati i plot in due diverse scale in modo da comprendere meglio il fenomeno:

- Scala decimale

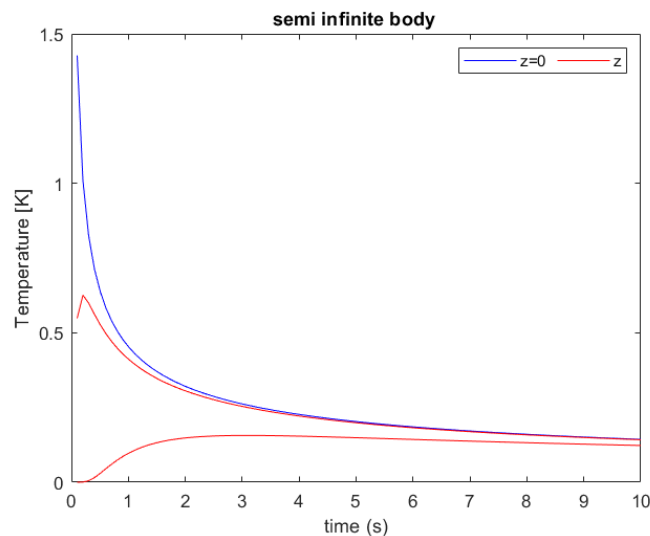


Figura 32 Soluzione analitica corpo seminfinito scala decimale

- Scala logaritmica

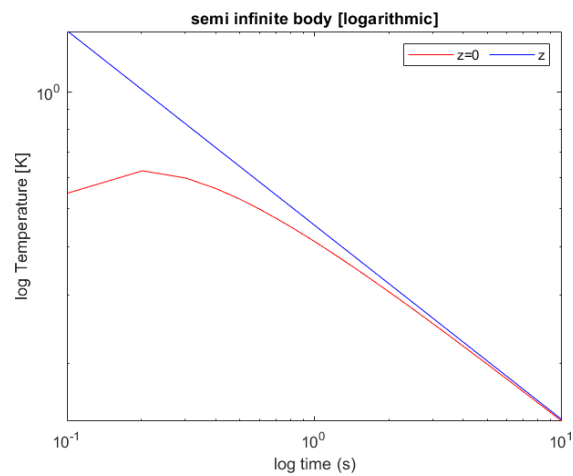


Figura 33 Soluzione analitica corpo seminfinito scala logaritmica

La curva blu rappresenta la temperatura sulla superficie. Le curve rosse sono parametrizzate in funzione della coordinata z che rappresenta la profondità a cui si fa riferimento. L'andamento generico lungo la superficie in funzione del tempo può essere approssimato ad una funzione che va come $1/\sqrt{t}$ in coordinate decimali ed una retta in coordinate logaritmiche.

4.3.2 Modello piastra spessore finito

Il modello a cui si fa riferimento è quello riportato in figura 10. Rispetto al caso precedente entra in gioco lo spessore finito seppur il modello rimane planarmente infinito, in modo da poter ancora usare l'approssimazione 1D. Gli andamenti ricavati sono plottati in scala logaritmica e parametrizzati in funzione dello spessore. Riportiamo in figura 34.

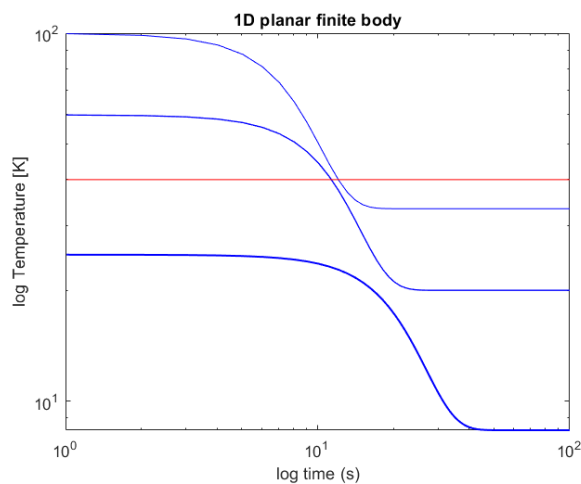


Figura 34 soluzione analitica lastra seminfinita scala logaritmica

Si è scelta la scala logaritmica in modo da meglio evidenziare i transitori termici di riscaldamento e raffreddamento. Come nel caso precedente le curve blu sono parametrizzate in funzione dello spessore. Le curve a temperatura più alta rappresentano punti più vicini alla superficie. La retta rossa è il caso limite ovvero un punto proprio sulla superficie stessa.

4.3.3 Lastra a due spessori

Dopo l'introduzione di modelli propedeutici allo studio analitico della conduzione si passa a considerare casi più vicini all'oggetto dell'analisi.

Il primo dei due modelli presi in esame può essere visto come uno scalino e rappresenta la soluzione analitica più vicina al caso studio della scaletta. Il modello a cui si fa riferimento è quello riportato in figura 11.

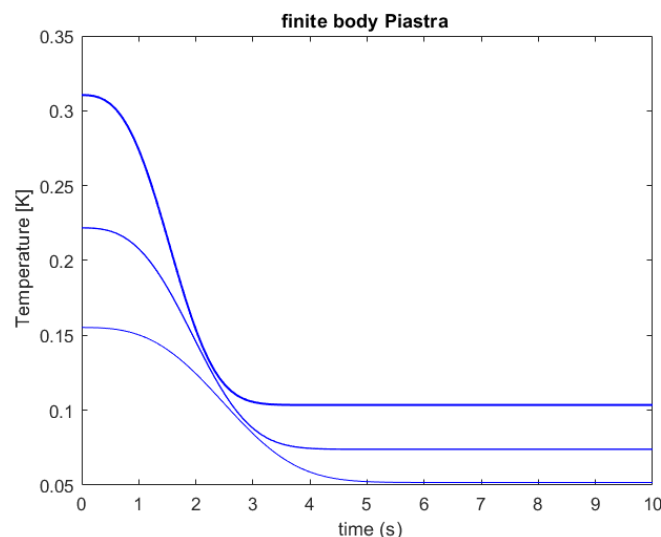


Figura 35 Andamento temperatura modello lastra a due spessori, scala decimale

le curve si differenziano per una diversa altezza dello scalino. In particolare, all'aumentare della differenza degli spessori delle lastre si ottengono temperature più elevate.

4.4 ELABORAZIONE DATI SPERIMENTALI

In questo paragrafo si estraggono i dati utili dal termogramma, frutto delle prove effettuate presso il laboratorio del DIMEAS al Politecnico di Torino. I settaggi operativi sono descritti nel capitolo Materiali e Metodi. Vengono utilizzati allo scopo i software ResearchIR e Matlab. Tramite l'utilizzo del primo strumento le registrazioni ottenute vengono esportate in formato .csv ('comma separated value'), un formato basato su file di testo utilizzato per importazione o esportazione di una tabella di dati. La dimensione

della tabella è pari alla risoluzione di acquisizione della termocamera, nel caso in esame 320 x 256 elementi. La termocamera registra i valori di temperatura di ogni singolo pixel dell'area di interesse su cui è stata puntata, nel caso studio lo 'spot' del laser unitamente alla zona intaccata dal riscaldamento. La dimensione è nell'ordine di circa 30 pixel. Esegue tale operazione per ogni 'frame' acquisito. Per comprendere meglio la procedura, si faccia riferimento alla figura 36.

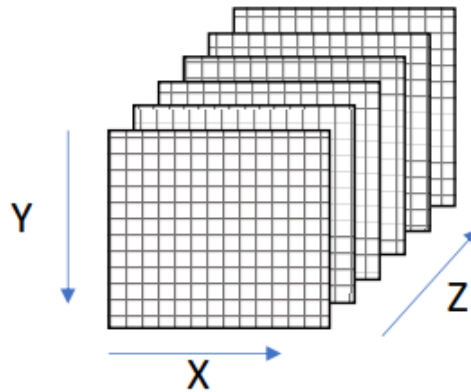


Figura 36 Schema acquisizione termogramma

In particolare, il piano xy rappresenta la risoluzione dello strumento mentre la direzione z rappresenta l'evoluzione nel tempo dei valori di temperatura dei medesimi pixel. Nota la durata di acquisizione della prova, 10 s, e la frequenza di acquisizione impostata per le varie prove, 600 Hz, è possibile stimare il numero di frame elaborati. Con questi input il software ha restituito tra 5990 e 6000 frame. È stato utilizzato un numero così alto di punti del segnale di temperatura perché, come anticipato nei precedenti capitoli, il lavoro specifico di settaggio delle prove è stato eseguito in lavori di tesi precedenti; in caso contrario, l'estrazione di tale mole di dati avrebbe comportato un considerevole rallentamento delle procedure.

Con un opportuno script matlab, si restringe lo studio al pixel centrale dello spot laser. Non viene analizzato il pixel che raggiunge la t_{max} ma un pixel fisso perché, in caso contrario, sarebbe potuto variare il pixel analizzato al variare del frame. I dati così estrapolati vengono trasposti in colonne e convertiti in formato excel. Questa operazione viene effettuata per i provini e gli spessori oggetto di indagine. Si riporta a titolo di esempio un estratto dei dati elaborati alla fine di questa prima fase.

frame	abstime	realtime_test1	test1	frame	abstime	realtime_test2	test2
0	49:02,6	0	21	0	09:31,6	0	2,13E+01
1	49:02,6	0,001669	2,11E+01	1	09:31,6	0,001667	2,13E+01
2	49:02,6	0,003333	2,09E+01	2	09:31,6	0,003336	2,14E+01
3	49:02,6	0,005	2,11E+01	3	09:31,6	0,005	2,12E+01
4	49:02,6	0,006573	2,10E+01	4	09:31,6	0,006667	2,13E+01

I parametri di interesse sono 'realtime_test', che rappresenta il tempo a cui è stato registrato il dato, e 'test', che rappresenta il rispettivo valore di temperatura in gradi centigradi. Si evince la possibilità di elaborazione in maniera relativamente semplice dai dati ottenuti in questa forma.

In questo momento ci soffermiamo su provini non verniciati identificati e descritti nel capitolo Materiali e Metodi.

Dividiamo l'estrapolazione dei dati in funzione del materiale.

4.4.1 PROVINI ACCIAIO

La forzante termica ottica laser è stata applicata a due spessori della scaletta, 2,5 e 10,04 mm. Si riporta il segnale in temperatura in funzione del tempo. Vengono effettuate 2 ripetizioni, chiamati test, per ogni spessore. Valore di emissività validato 0,5.

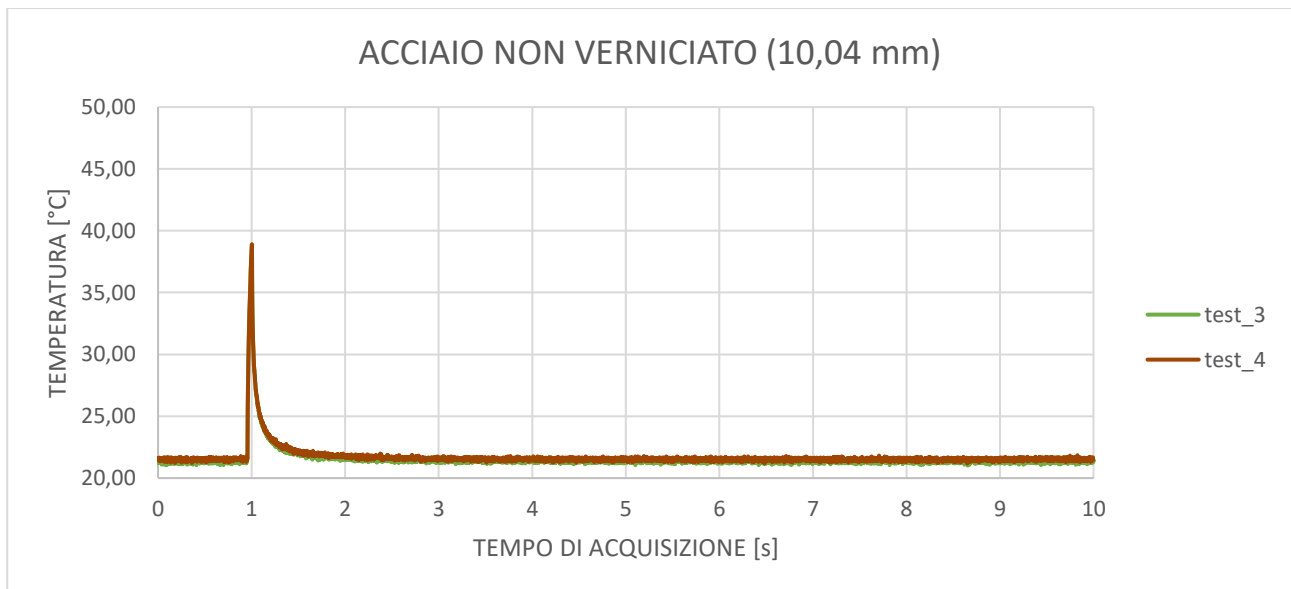


Figura 37 Evoluzione temperatura scaletta gradino 10,04 mm

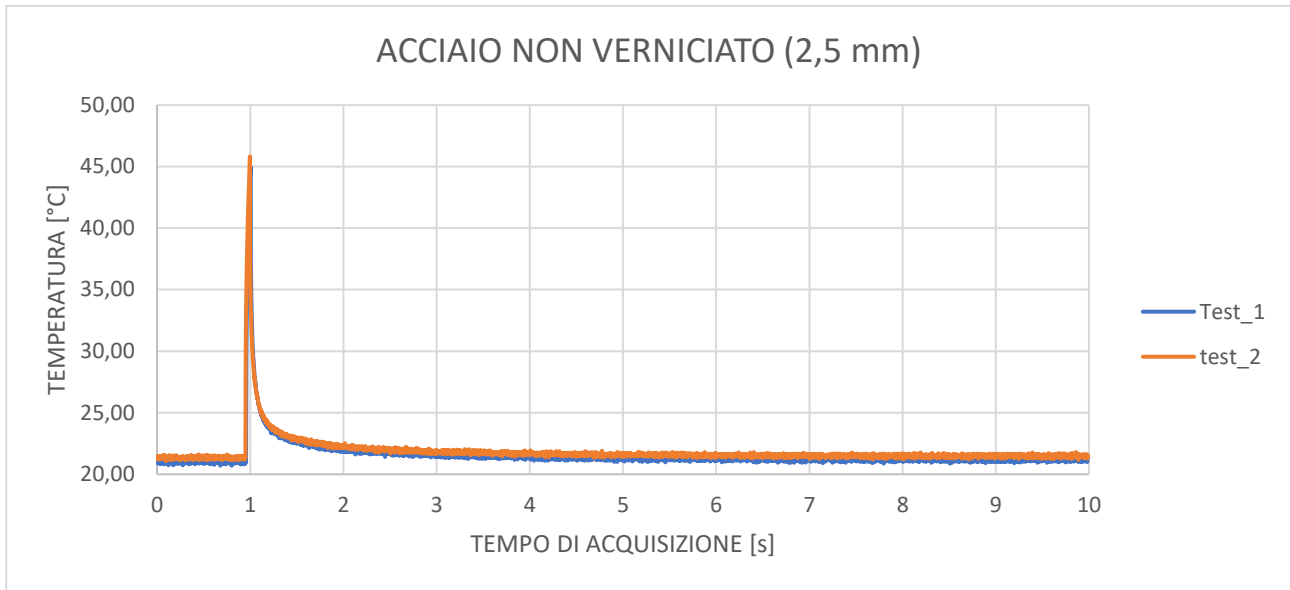


Figura 38 Evoluzione temperatura scaletta gradino 2,5 mm

Si evince come il riscaldamento sia estremamente veloce con il picco di temperatura più alto raggiunto su spessori inferiori. Tale comportamento è dovuto al fatto che, a parità di energia fornita, la superficie a contatto con l'aria è maggiore con spessori minori. L'aria è un ottimo isolante, a differenza dell'acciaio, e limita lo scambio termico con la conseguenza di un incremento di temperatura sul pezzo. Il valore massimo della curva si attesta sui 45° a spessore 2,5 mm e sui 38° a spessore 10,04 mm. Importante notare la ripetibilità della misura vista la variazione inferiore al 2% sui valori sperimentali. Fare attenzione anche alla rapidità del transitorio di raffreddamento che può ritenersi concluso dopo due secondi dallo start del laser.

4.4.1.1 Analisi in frequenza

Il software Irta fornisce una veloce analisi in frequenza considerando l'intera misura realizzata. Per ricavare informazioni più dettagliate si è reso necessario costruire uno script apposito su matlab. L'utilizzo di uno script autocostruito ha il vantaggio di conoscere le funzioni e gli algoritmi usati per l'estrazione dei parametri di interesse.

In questo paragrafo del capitolo relativo alle elaborazioni andiamo, tramite analisi in frequenza, a verificare che l'inserimento della forzante sia stato effettuato correttamente. Idealmente la sollecitazione termica ha la forma di figura 26 nella sezione Materiali e Metodi: funzione rettangolare di tipo impulsivo. L'onda di tipo quadratico eccita molte frequenze tutte della stessa intensità teoricamente. Nella realtà non si riesce a ricadere in questo assunto. La risposta attesa nel dominio delle frequenze deve avere la forma tipica della risposta libera della sollecitazione.

Per poter effettuare la valutazione ci interessa solo la parte di raffreddamento.

Viene seguita la seguente procedura dal segnale di temperatura non modificato in partenza:

- a) Rimozione del tratto iniziale
- b) Rimozione fase di riscaldamento
- c) Applicazione trasformata di Fourier (specifico script in matlab)

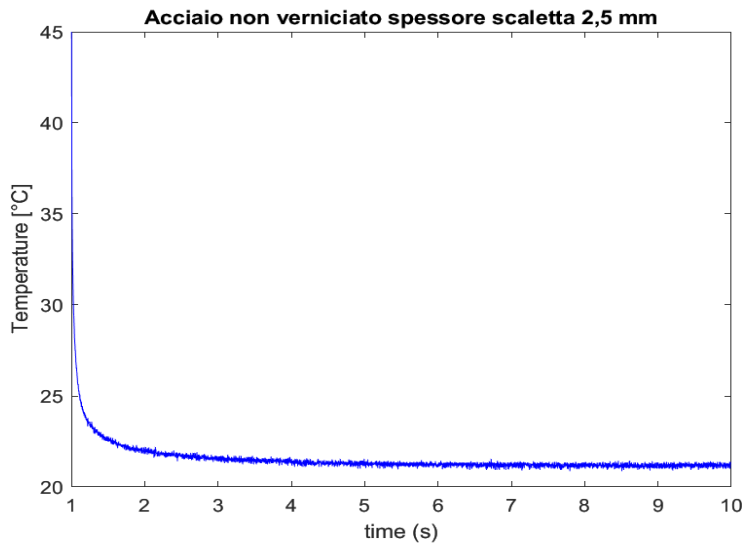


Figura 39 Temperatura acciaio non verniciato 2,5 mm, solo raffreddamento

In seguito all'applicazione dei primi due punti il segnale si presenta come segue:

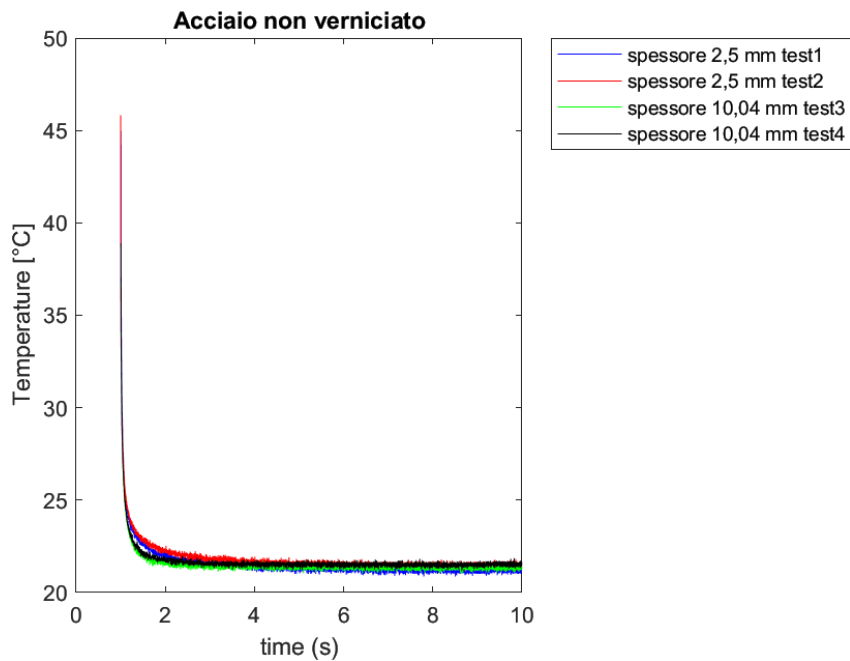


Figura 40 Temperatura acciaio non verniciato 2,5 mm, solo raffreddamento, tutte le prove

Passando al dominio delle frequenze i risultati sono presentati in termini di modulo e fase. Particolare attenzione è da porre alla frequenza massima studiabile dipendente dalla frequenza di campionamento della termocamera. Nel caso in esame la massima frequenza studiabile è di 300 Hz.

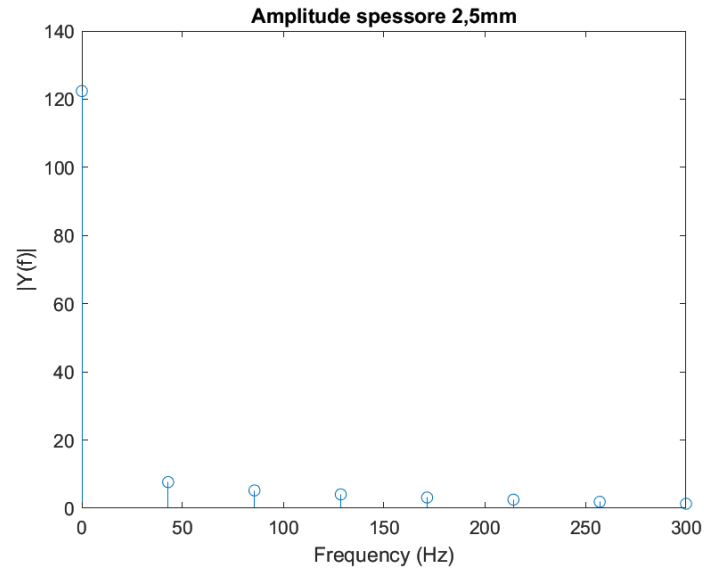


Figura 41 Risposta in frequenza segnale 2,5 mm acciaio, Ampiezza

Tenendo presente il grafico specchiato, si evince il classico andamento a campana dell'ampiezza con curva monotona decrescente. Si riportano anche le altre ampiezze.

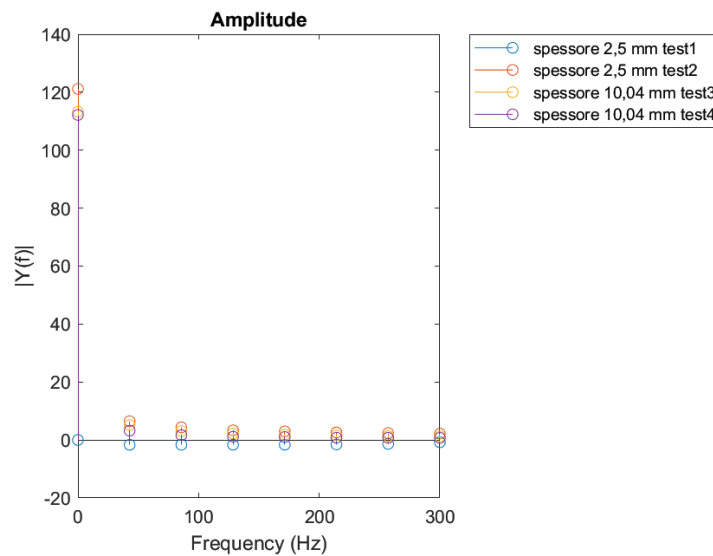


Figura 42 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Ampiezza

Viene confermato lo stesso comportamento anche per i restanti test.

Si plotta anche la fase perché è meno influenzata dal riscaldamento non omogeneo e dalla variazione di emissività.

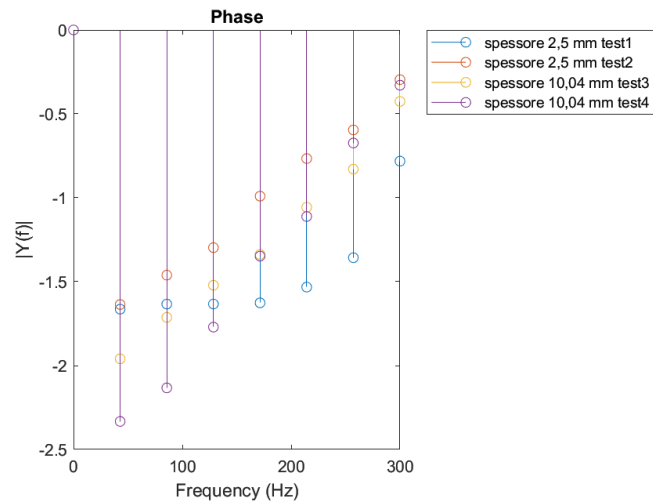


Figura 43 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Fase

Sulle fasi si ricava una maggiore variabilità rispetto alle ampiezze permettendo una migliore lettura delle differenze tra gli spessori esaminati e i test effettuati. Anche con questo secondo parametro viene confermato l'andamento monotono decrescente tipico di una risposta libera del sistema. La parte che più interessa nello studio termografico è relativa alle basse frequenze che influenzano maggiormente la superficie. Parliamo sempre di riscaldamenti veloci che difficilmente penetrano in profondità.

4.4.2 SCALETTA ALLUMINIO

Per la scaletta in alluminio ripetiamo le stesse operazioni effettuate sul gemello in acciaio. Non variano forzante, punti di applicazione e numero di prove eseguite. Il valore di emissività è il principale discriminante. Si passa dallo 0,5 dell'acciaio a 0,45 nel caso dell'alluminio. La differenza di emissività, nonostante possa sembrare minima, comporta significative variazioni. A tal proposito a fine capitolo si riporta un caso esaminato.

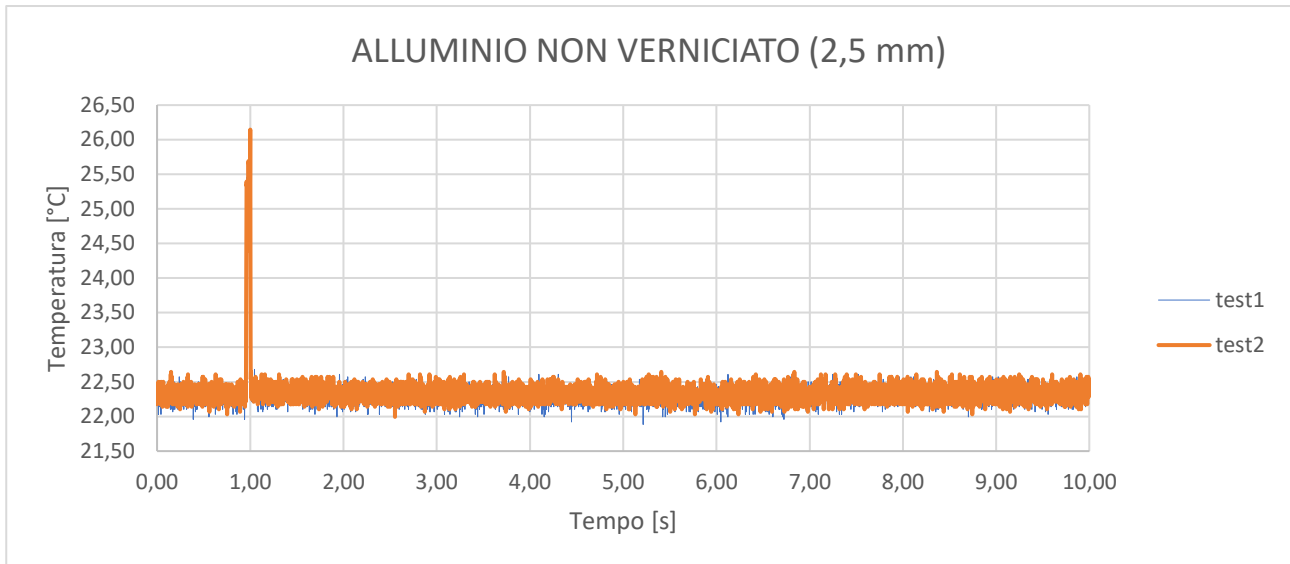


Figura 44 Evoluzione temperatura scaletta 2,5 mm

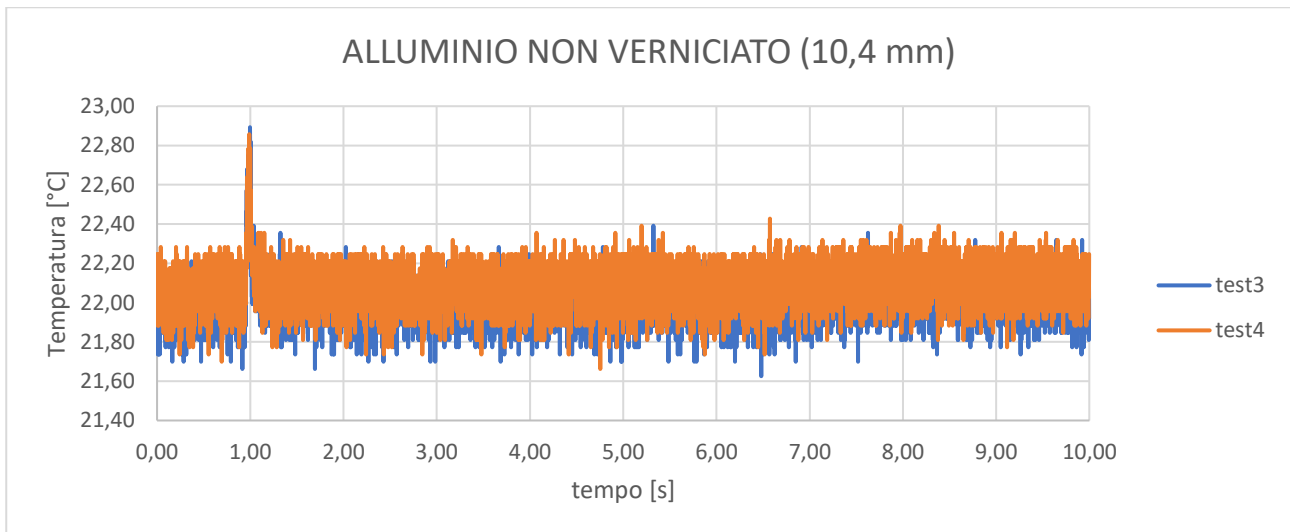


Figura 45 Evoluzione temperatura scaletta 10,04 mm

Il segnale di temperatura risulta molto 'sporco' e, soprattutto nel caso a spessore maggiore, è molto difficile individuare chiaramente le curve di riscaldamento e raffreddamento. La causa principale risiede nella proprietà termica principe dell'alluminio ovvero la conducibilità. Il calore apportato è diffuso al materiale circostante ed è tanto più veloce tanta meno superficie è a contatto con l'aria. Prendendo in esame solo le temperature massime, viene confermata la fisica della scaletta in acciaio, con valori superiori su spessori più elevati. Si parla di 26° e 22,8° decisamente inferiori alla scaletta gemella. La ripetibilità della misura è confermata dalla variabilità dei test inferiore al 1,5%.

4.4.2.1 Analisi nel dominio delle frequenze

In questo paragrafo del capitolo relativo alle elaborazione si va, tramite analisi in frequenza, a verificare che l'inserimento della forzante sia stata effettuata correttamente. Idealmente la sollecitazione termica ha la forma di figura 26 nella sezione Materiali e Metodi: funzione rettangolare di tipo impulsivo. L'onda di tipo quadratico eccita molte frequenze tutte della stessa intensità teoricamente. La risposta attesa nel dominio delle frequenze deve avere la forma tipica della risposta libera della sollecitazione.

Per poter effettuare la valutazione ci interessa solo la parte di raffreddamento.

Viene seguita la seguente procedura dal segnale di temperatura non modificato in partenza:

- a) Rimozione del tratto iniziale
- b) Rimozione fase di riscaldamento
- c) Applicazione trasformata di Fourier (script specifico in matlab)

In seguito all'applicazione dei primi due punti il segnale si presenta come segue:

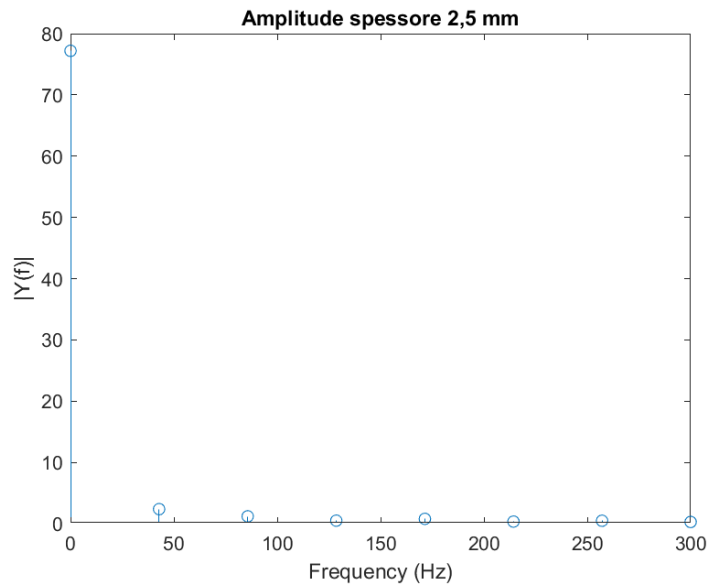


Figura 46 Risposta in frequenza segnale 2,5 mm alluminio, Ampiezza

Considerando in grafico specchiato si evince l'andamento monotono decrescente atteso. Si plottano gli altri test.

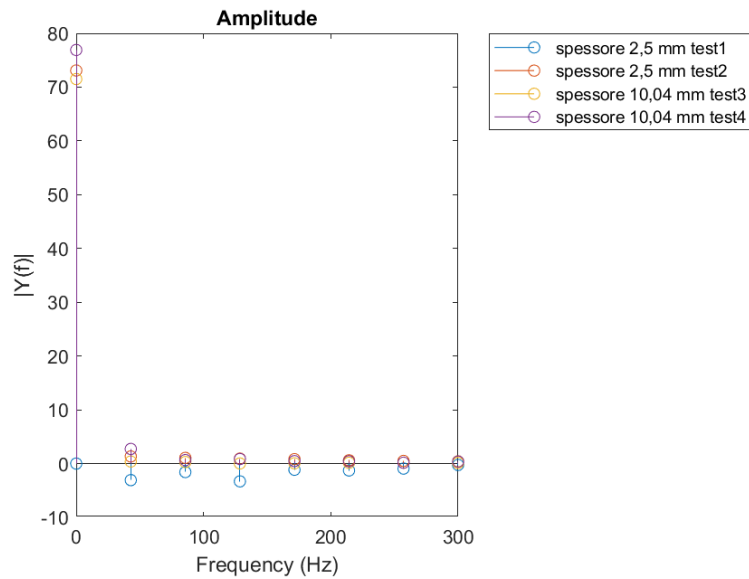


Figura 47 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Ampiezza

Prendendo in esame le altre prove si conferma lo stesso comportamento.

Rispetto al caso studio acciaio, i moduli risultano inferiori, minor livello energetico.

Verifichiamo il cambio di comportamento anche sulla fase.

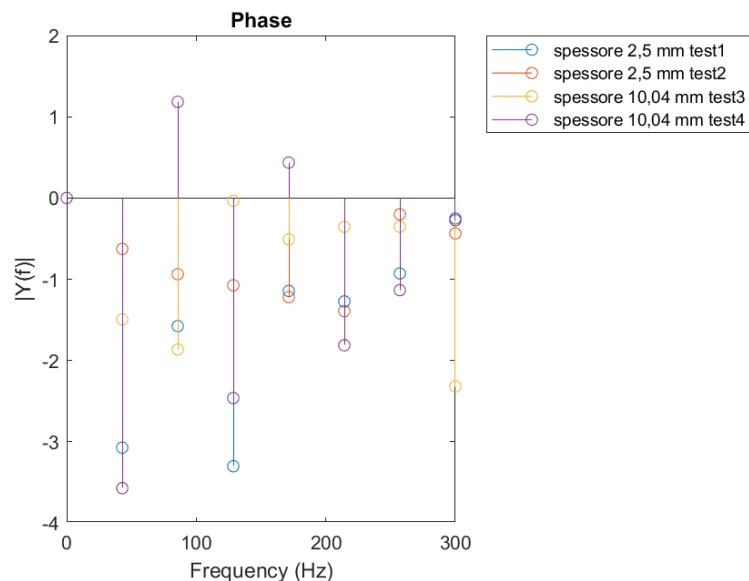


Figura 48 Risposta in frequenza tutti i test acciaio, Fase

Si osserva una variazione numerica del parametro accompagnata dall'assenza del comportamento monotono decrescente, in luogo di punti anche positivi. La condizione di risposta libera del sistema diventa sempre meno verificabile all'aumentare dello spessore considerato. La causa può essere ricondotta all'incapacità della forzante termica settata di scaldare adeguatamente l'area di interesse. Un'altra causa può derivare dalla forzante di tipo puntiforme, che scalda il provino in maniera troppo

localizzata. In aggiunta la natura intrinseca del materiale di cui è composta la scaletta comporta un processo di diffusione del calore molto più veloce dell'acciaio esaminato prima. Per migliorare l'estrazione dei parametri in frequenza è possibile utilizzare dei filtri che non sono stati oggetto di indagine ma possono essere interessanti per uno sviluppo futuro.

Per un più semplice confronto con le simulazioni o i modelli analitici sono stati scelti i dati sperimentali relativi alla scaletta in acciaio.

4.5 COSTRUZIONE MODELLI FEM

La termografia è una tecnica che nasce e si sviluppa in ambito sperimentale. Per poter effettuare prove e misurazioni è necessario molto tempo ed accorgimenti specifici, come nel caso di termografia ottica che usa sorgenti laser. Per ridurre il tempo oppure effettuare delle considerazioni specifiche o di dettaglio, l'uso di modelli agli elementi finiti può essere di aiuto. Un possibile vantaggio comporta la possibilità di individuare specifici comportamenti non direttamente leggibili da termogramma.

Nel lavoro di tesi si farà riferimento al software dedicato Ansys, il quale permette di lavorare con simulazioni 2D e 3D. In base al problema fisico da simulare si deve accuratamente scegliere il tool specifico. Trattando con l'equazione del calore di Fourier in condizioni non stazionarie, viene scelto il tool 'Ansys thermal transient'. La geometria dei componenti utilizzati nel prosieguo è costruita usufruendo del modellatore 3D Solidworks e non direttamente della piattaforma di input dedicata del tool thermal transient. L'importazione necessita di un formato specifico in modo da permetterne la decodifica. Per tale motivo i file necessari devono essere salvati con estensione .sat ('Testo ACIS Standard'), memorizzati in un formato di testo ASCII. Questa procedura in generale permette di usare più tipologie di input grafico per lo stesso simulatore.

Con l'uso dei simulatori commerciali agli elementi finiti, si deve porre particolare attenzione sia alla scelta del tool apposito per il problema da analizzare sia anche alla modalità di elaborazione delle equazioni. A differenza della risoluzione tramite algoritmi costruiti in proprio, per esempio con l'ausilio di matlab (caso analisi in frequenza), non si conoscono le semplificazioni o assunzioni effettuate dietro l'interfaccia semplificata. Nella ricerca delle soluzioni i solutori commerciali cercheranno sempre di fornire un output anche se questo non ha nulla a che vedere con il comportamento fisico reale. Fatte queste doverose premesse, viene presentata la logica seguita nel successivo lavoro in modo da non incorrere nei problemi appena descritti.

Si parte verificando il sistema di equazioni utilizzate da Ansys in un caso limite stazionario, di cui è nota la soluzione analitica, modificando e complicando poi il problema. Nel passo successivo si passerà dallo stazionario al transitorio per poi, in ultimo, a risolvere la forzante termica puntiforme con la Scaletta. Si riporta il flow chart con gli step seguiti nello sviluppo di simulazioni fem.

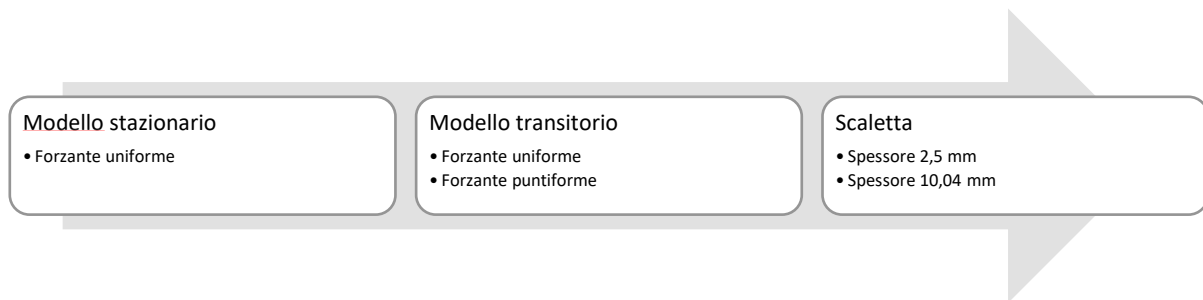


Figura 49 Schema logico analisi modelli fem

4.5.1 Ansys thermal analysis

La base fisica del problema è la risoluzione dell'equazione generale della conduzione (vedi Stato dell'arte, fisica del problema). L'ipotesi di base è relativa all'adiabaticità. Nella realtà è praticamente impossibile verificare questa assunzione. Nella migliore delle situazioni abbiamo il componente oggetto di indagine poggiato su dei supporti di materiale isolante circondato da aria. Si lavora con l'equazione di Fourier con l'aggiunta del termine \bar{q} che tiene conto della generazione del calore. Si riporta l'equazione che rappresenta quanto detto.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k * \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k * \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k * \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{q} = \rho * C_p * \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

Completano il sistema di equazioni necessarie al problema termico transitorio le equazioni di convezione ed emissività. Lavorando in laboratorio in condizioni protette, tutto il materiale, tra strumentazione e provino, è racchiuso all'interno di un involucro. Ciò implica influenza molto bassa del termine convettivo mentre il valore \bar{q} sarà considerato nullo. Verranno definiti in seguito i parametri da impostare all'interno del solutore numerico. Prima di procedere con il vero e proprio lavoro di simulazione si presenta una sequenza di immagini in modo da rendere chiaro al lettore la modalità di inserimento dei dati tramite il workbench, figura 50. La procedura seguita avrà sempre la stessa logica con il semplice adattamento di parametri e importi numerici.

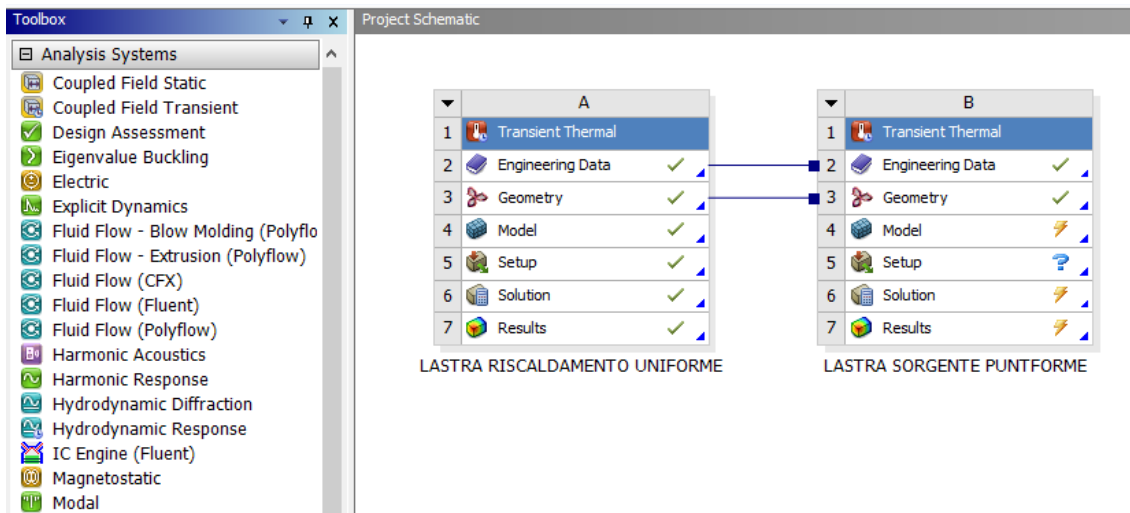


Figura 50 Interfaccia Workbench Ansys

Dopo la selezione ed il posizionamento del blocchetto di lavoro si apre l'interfaccia con l'elenco ordinato delle operazioni da eseguire numerate dal 2 al 7. In realtà il vero inserimento dei dati si ferma al setup, i due step successivi sono utili nel postprocessing, per la tabularizzazione o estrazione di dati. Una volta inseriti i parametri relativi ad ogni step, alla fine della barretta comparirà la spunta verde. Di notevole importanza la possibilità di copiare in automatico le informazioni tra distinte simulazioni. Graficamente è visualizzato da una linea blu di collegamento.

Si espongono brevemente le operazioni principali all'interno di ogni blocco.

Nella sezione 'Engineering Data' si può selezionare da database il materiale di interesse oppure inserirlo manualmente tramite le proprietà principali. Sarà questa la strada che verrà usata. In particolare, l'acciaio costituente la scaletta ha le seguenti proprietà:

- Densità = $8400 \frac{kg}{m^3}$
- Conduttività termica = $40 \frac{W}{m \cdot K}$
- Calore specifico = $460 \frac{J}{Kg \cdot K}$

Anche se non verrà più specificato, questi saranno i valori numerici utilizzati in tutte le seguenti simulazioni.

Si riporta l'interfaccia in figura 51.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	8400	kg m ⁻³	
4	Isotropic Thermal Conductivity	40	W m ⁻¹ ...	
5	Specific Heat, C _p	460	J kg ⁻¹ ...	

Figura 51 tabella di inserimento dati del materiale

Nella sezione 'Geometry' non si costruirà la geometria tramite il cad interno ad Ansys ma verrà importata. L'operazione che invece verrà effettuata sull'interfaccia grafica, 'SpaceClaim', verterà sull'assegnazione di nomi definiti agli elementi geometrici. Le 'named selection' create per spigoli e facce permetteranno di individuare in maniera univoca le parti nella successiva generazione della mesh.

La sezione 'model' è occupata dalla creazione della mesh. Dopo il check per verificare la corretta importazione della geometria e relative connessioni tra parti, inizierà il processo vero e proprio. In una prima approssimazione si utilizzerà lo strumento di meshing automatico. Tramite le 'named selection' di cui prima si darà forma ad un refinement specifico del componente. Gli spigoli e le facce saranno suddivisi adeguatamente in modo da permettere mesh più fitte o più lasche in base alle esigenze. Si riporta un esempio fornito in automatico dal software in cui la parte più spessa del componente non presenta un numero di elementi inferiore rispetto allo spessore più piccolo ma al contrario un infittimento lungo i bordi.

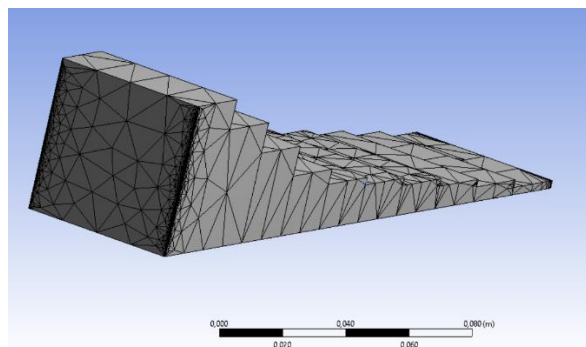


Figura 52 esempio mesh scaletta

Nella sezione 'setup' vengono inserite le condizioni iniziali e quelle al bordo. Si riporta figura 53.

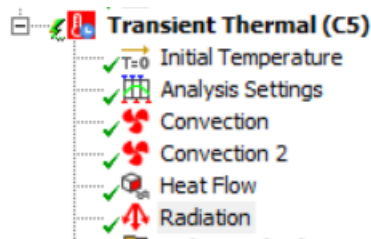


Figura 53 Interfaccia del 'setup'

Si descrive il generale settaggio dei parametri della sezione

- Initial Temperature: inseriamo la temperatura ambiente misurata nelle prove sperimentali.
- Analysis Settings: inseriamo la suddivisione dei tempi, la durata totale della registrazione e la forzante laser. Si riporta la tabella usata con la scaletta.

Tabella 7 Tabella suddivisione dei tempi Ansys

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	1,
2	2	1,0001
3	3	1,0501
4	4	1,0502
5	5	10,

- Convection: si inserisce la convezione sull'intera superficie del pezzo. Il parametro da settare è il 'film coefficient'; verrà considerato fisso in prima approssimazione e poi fatto variare in funzione della temperatura.
- Heat flow: funzione dove inserire la potenza del laser. Nelle frazioni temporali definite in precedenza vengono settati i valori in Watt derivanti dall'ambito sperimentale. Si riporta un esempio in tabella 8.

Tabella 8 Tabella inserimento forzante termica Ansys

Tabular Data			
	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Heat Flow [W]
1	1	0,	= 0,
2	1	1,	0,
3	2	1,0001	50,
4	3	1,0501	50,
5	4	1,0502	0,
6	5	10,	= 0,

- Radiation: parte radiativa del problema in cui avviene l'inserimento dell'emissività.

Dopo questa premessa valida per tutte le successive simulazioni si passa allo studio dei modelli. Prima di esaminare nel dettaglio la scaletta si effettuano delle prove intermedie.

4.5.2 LASTRA PIANA FINITA

4.5.2.1 Modello stazionario

Si prende in esame una lastra piana finita delle dimensioni 254x100x50, misure del blocco iniziale da cui per asportazione di materiale è stata estratta la scaletta: viene definita come lastra di calibrazione. Si riporta la geometria in figura 54.

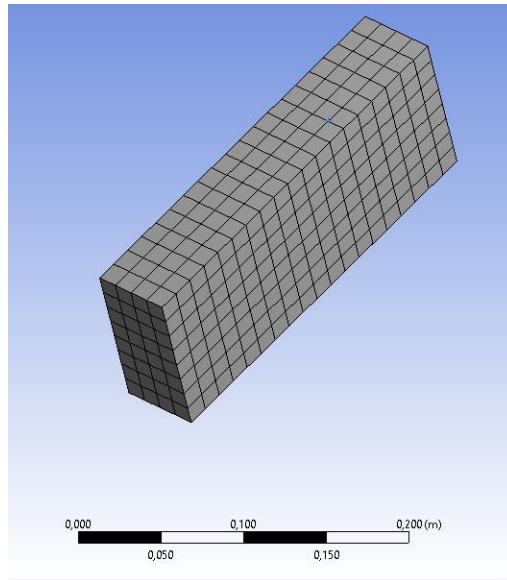


Figura 54 Vista assonometrica lastra piana finita

Di questo caso specifico, con l'inserimento di adeguate condizioni al bordo e forzante termica, è nota la soluzione analitica. Descriviamo le ipotesi:

- Modello classico di Fourier
- Riscaldamento uniforme su entrambe le superfici della piastra
- Effetto convettivo trascurabile
- Approssimazione di tipo 1D

Ne deriva una distribuzione di temperatura di tipo lineare lungo lo spessore come riportato in figura 55.

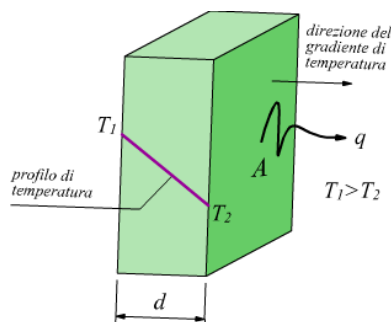


Figura 55 Andamento lineare di temperatura con lastra piana

Specifichiamo le ipotesi fatte nel precedente paragrafo applicandole al solutore thermal transient:

- Mesh con elementi quadrangolari regolari, figura 54
- Coefficiente convettivo, 'film coefficient', molto basso in modo da poterne considerare trascurabile l'effetto. Il modello di Fourier verte sull'ipotesi di adiabaticità; con convezione troppo elevata ci discosteremmo troppo da tale assunto
- Non viene inserita la parte radiativa, no emissività
- Tempo totale di simulazione da definire per ricadere nello stazionario.

La temperatura delle due facce è stata posta a 50° e 20°.

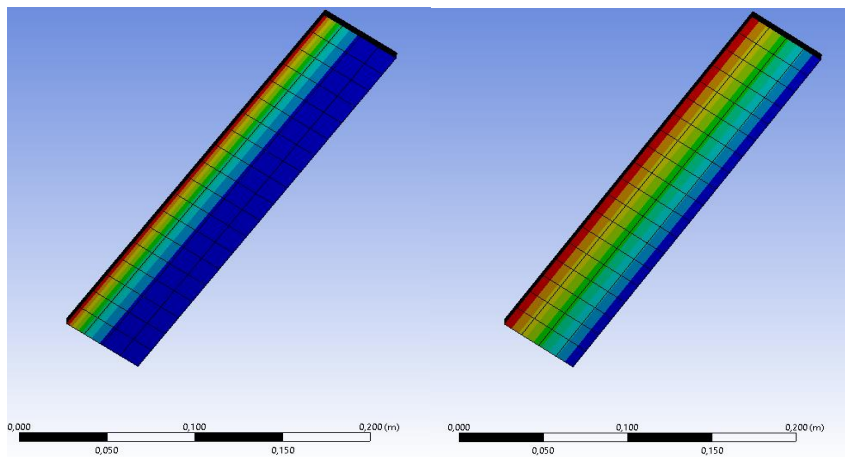


Figura 56 Distribuzione di temperatura della piastra dopo 10 s e 100 s

Graficamente la condizione di linearità ricercata sembra avvenire per un intervallo temporale di 100s. Vediamo se è suffragata, plottando alcuni valori numerici di punti impostati sul simulatore tra le due facce a temperatura imposta.

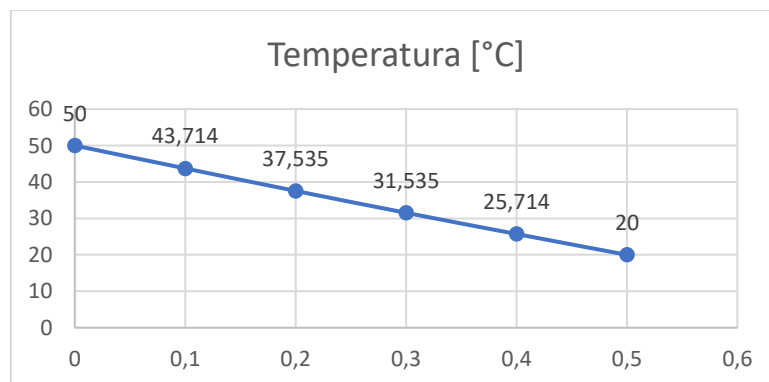


Figura 57 Andamento temperatura lastra piana finita in stazionario

Da figura 57 possiamo affermare il corretto match tra la soluzione attesa e simulata fem.

Il passaggio successivo lascia l'ipotesi di stazionarietà per andare a indagare il transitorio termico.

4.5.2.2 Modello transitorio

Con il modello di lastra piana si può fare riferimento alla soluzione analitica descritta nel capitolo relativo allo stato dell'arte. Se ne riporta il plot effettuato su Matlab inserendo la forzante termica uniforme Q pari a $10 \frac{MJ}{m^2}$ e lo spessore di figura 58.

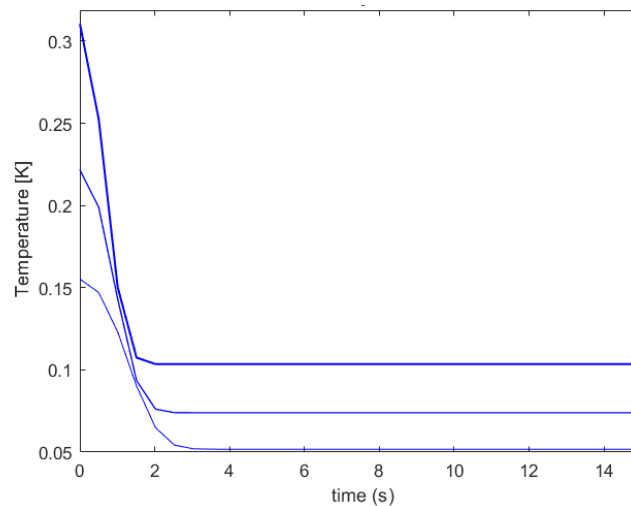


Figura 58 Lastra piana forzante uniforme

Il delta di temperatura massimo è pari a $0,3^\circ$ facendo riferimento alla curva relativa alla superficie, ovvero quella che nel grafico raggiunge il picco massimo. Il raffreddamento avviene in maniera molto veloce e può ritenersi concluso dopo poco più di 2 s.

Lo stesso carico termico viene posto nel solutore fem, facendo particolare attenzione alla conversione delle unità di misura di Q : su Ansys non si può fornire una energia ma una potenza.

Il primo punto comporta la costruzione della mesh che viene riportata in figura 59.

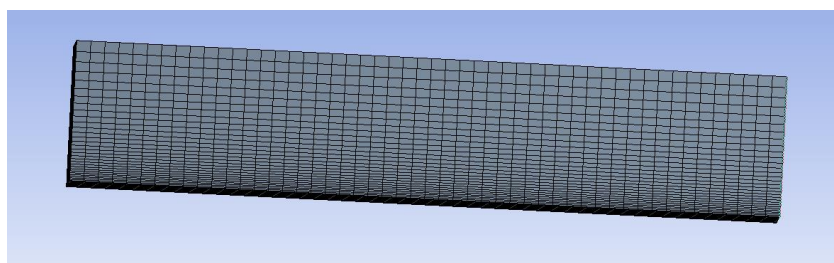


Figura 59 Mesh della lastra con transitorio termico

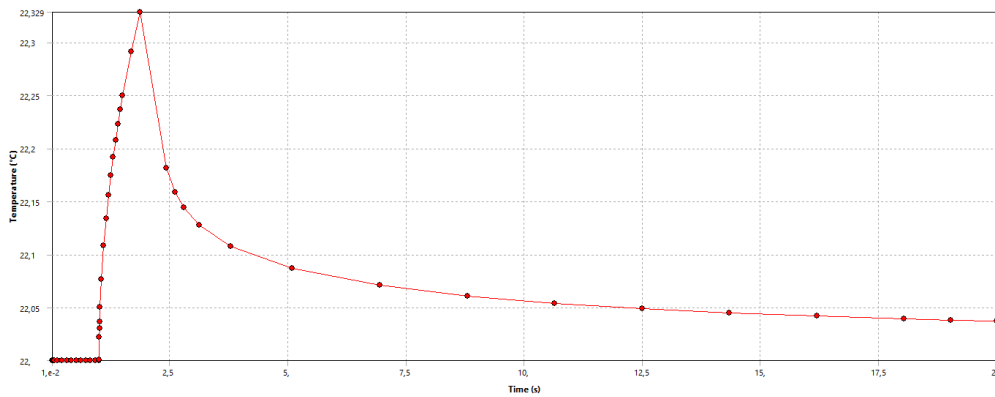


Figura 60 Transitorio lastra piana finita forzante uniforme, Ansys

Il delta di temperatura massimo raggiunto sulla superficie è pari a $0,3^\circ$. La fase di raffreddamento procede in maniera leggermente più lenta. Questa differenza può essere attribuibile al fatto che la fase di riscaldamento viene considerata istantanea nel modello analitico mentre viene distribuita su tempi più dilatati nel simulatore, nell'ordine del mezzo secondo. Si precisa che è stata considerata la temperatura di un nodo centrale sulla superficie in modo da non avere interferenza con gli effetti di bordo.

4.5.2.3 Forzante impulsiva puntiforme

Passando da forzanti uniformi a localizzate si deve tener conto di un altro parametro, ovvero lo 'spot' del laser. Per semplicità viene preso pari all'impronta stimata nelle prove sperimentali. La dimensione inserita è di 5 mm.

Valutiamo l'effetto del diverso spessore e della dimensione della piastra. Consideriamo i casi studio con spessore di 2,5 mm (Test_1) e 10,04 mm (Test_3) come da provino e dimensioni 254x50mm e 254x100 mm. La lunghezza rimane invariata visto che stiamo parlando di prove localizzate.

Infine, viene studiato un caso limite di problema simmetrico riportato in figura 61.

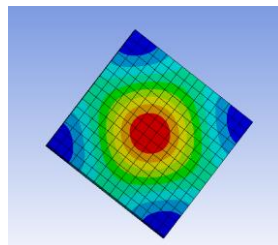


Figura 61 sorgente puntiforme caso simmetrico

Si riportano le temperature massime di ogni prova nella seguente tabella 9. In ascissa ed in ordinata sono rispettivamente presenti l'area e lo spessore delle lastre trattate.

Tabella 9 Temperature massime lastra singolo spessore, Ansys

		254 x 100 mm	254 x 50 mm	50 x 50 mm
Spessore 2,5	Test_1	24,2 °C	34,235 °C	30,859
Spessore 10,04	Test_3	23,768 °C	25,548 °C	30,889

Le temperature più elevate vengono raggiunte con spessori inferiori. Stringendo la larghezza della lastra notiamo lo stesso comportamento in aggiunta ad un aumento di modulo della temperatura massima. Il fenomeno ha una sua logica visto che modificando la forma si è andati ad aumentare l'area a contatto con aria in seguito ad una diminuzione del volume.

Quest'ultimo modello è molto importante poiché gli spessori in gioco saranno gli stessi della scaletta ma presi singolarmente. Dalla vista assometrica di figura 62 si evince come il provino possa essere visto come tante piastre una accanto all'altra.

4.5.2.4 Scaletta

Il primo passo è la modellazione su solidworks note le quote del provino utilizzato nel laboratorio. Si tratta di dieci gradini della stessa lunghezza posti a diversi spessori.

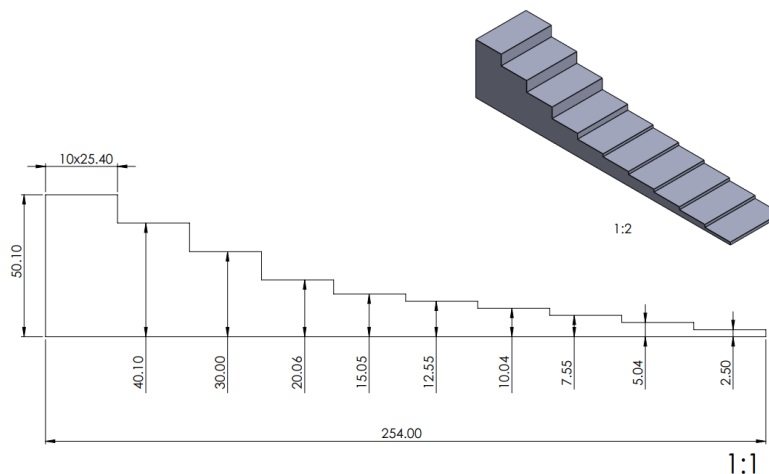


Figura 62 Quote scaletta

Nella costruzione della geometria stessa si individua l'area su cui poi sarà imposta la forzante termica, che deve andare a simulare il fascio laser che vi impatterà.

In particolare, vengono disegnate tre scalette disponendo lo 'spot' in tre diverse posizioni.

- Spot del laser sul cambio di geometria
- Spot del laser sul gradino
- Spot di due diverse dimensioni

Per uniformità con il caso sperimentale, le zone di interesse sono i due gradini a spessore 2,5 mm e 10,04 mm. Si riporta graficamente il caso con lo spot di due diverse dimensioni in figura 63.

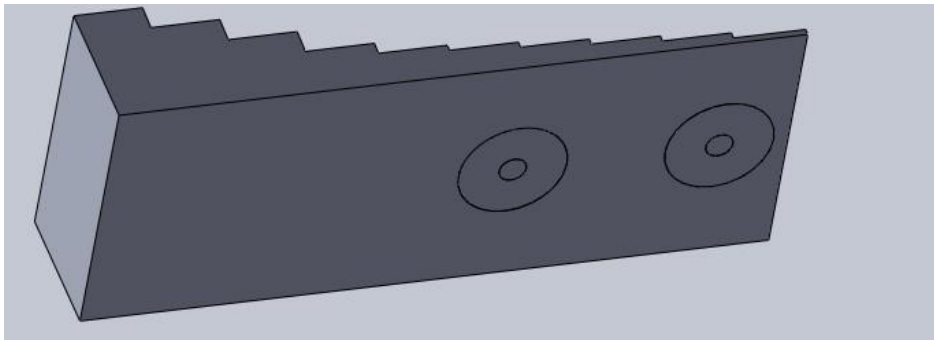


Figura 63 Scaletta con spot laser

L'obiettivo in questa prima fase è capire come inserire la forzante di tipo laser ed evidenziarne il comportamento. Per la costruzione del modello si eseguono gli step descritti ad inizio capitolo, paragrafo Ansys thermal analysis. Fatto l'inserimento dei parametri del materiale e importata correttamente la geometria, verificando che non ci siano errori, si passa alla mesh. Si parte dalla generazione automatica per poi raffinare nel prosieguo. Per la forzante vengono scelti i valori massimi di funzionamento della sorgente, il laser ottico, ovvero 50 W per una durata della somministrazione di calore di 300 ms.

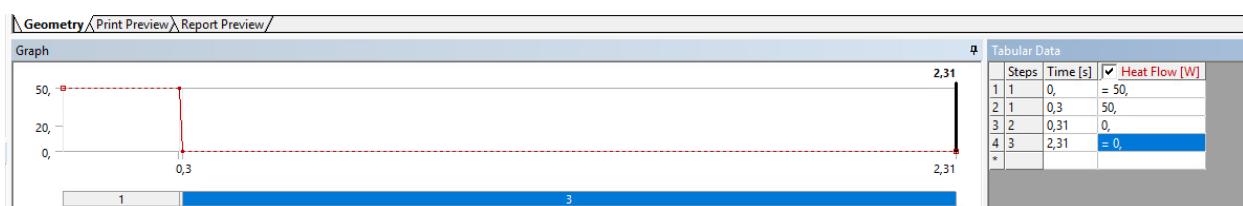


Figura 64 forzante termica Ansys

Vengono posti elementi di tipo triangolare con raffinamento lungo lo spessore all'interno del generico volume mentre si passa a elementi quadrangolari per discretizzare la porzione di materiale all'interno dello spot. Si riporta graficamente quanto detto.

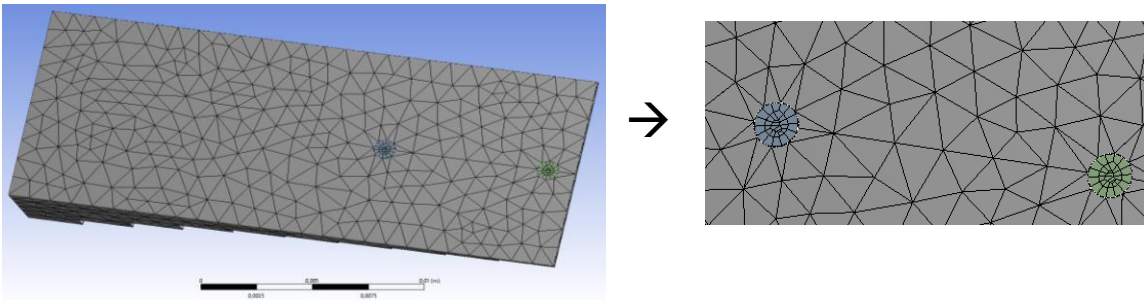


Figura 65 Esempio mesh mista

Viene eseguita l'analisi di sensitività per capire l'influenza della discretizzazione sulla temperatura. I parametri analizzati sono proprio la temperatura e l'errore massimo, variabili dipendenti dalla dimensione minima degli elementi inserita manualmente. Per la temperatura si fa riferimento ad un nodo interno allo spot mentre l'errore di tipo energetico è globale.

Si riporta la tabella 10 usata per le prove.

Tabella 10 tabella analisi di sensitività

dimensione elementi [m]	elementi	temperatura nodo [°C]	errore massimo
0,05	486	51,8	0,13065
0,025	1621	53,3	0,0864
0,01	2027	54,7	0,0746
0,005	2254	56,6	0,0738
0,001	2710	57,1	0,0735

Una considerazione da effettuare è relativa alla modalità con cui il software gestisce tali parametri, in particolare la dimensione minima degli elementi. Il solutore apporta delle modifiche automatiche a questo parametro dimensione minima senza che l'utente venga avvertito. Questa problematica può comportare locali irregolarità della mesh da risolvere.

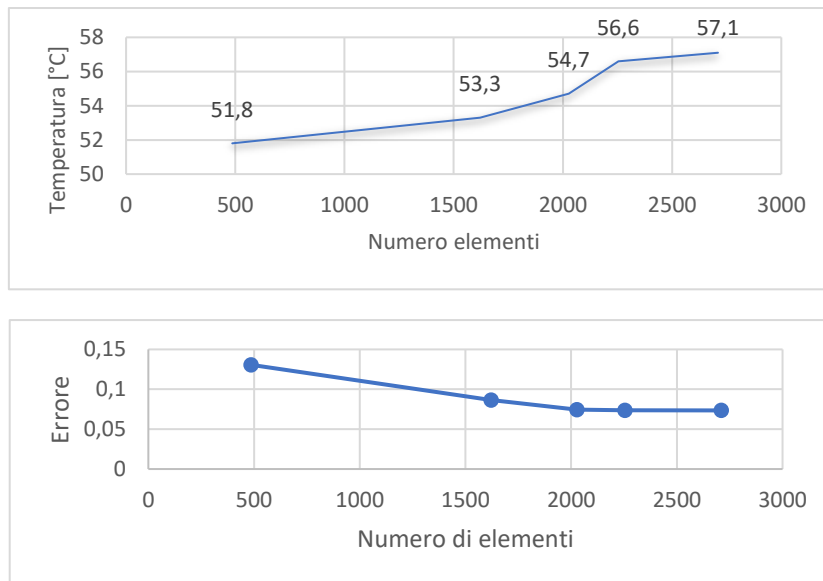


Figura 66 Analisi sensitività Mesh

Si ha un effettivo beneficio dell'aumento dello sforzo computazionale fino ad un certo grado di infittimento, nell'ordine dei 2000 elementi, che corrispondono ad elementi di dimensione circa di 5 mm.

Fatta questa premessa di tipo quantitativo, andiamo a osservare il comportamento macroscopico. La procedura serve a comprendere l'area effettivamente interessata ed i tempi in gioco nel processo riscaldamento-raffreddamento. Si effettua l'operazione con le tre costruzioni geometriche elencate in precedenza.

Si parte analizzando il pezzo con disposizione della forzante sul cambio di geometria. Si riporta la situazione dopo 1 s dall'inizio della prova. Lo start del laser viene posto all'istante zero.

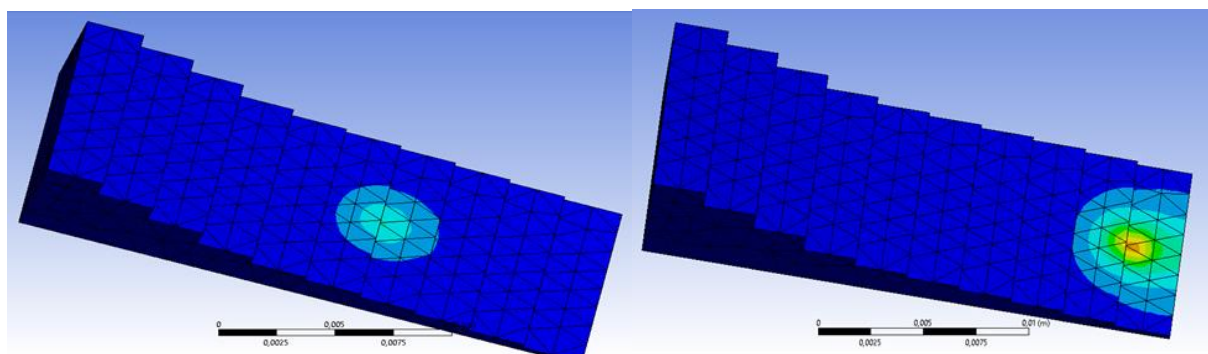


Figura 67 Scaletta analisi qualitativa transitorio termico, Ansys

Si osserva una migrazione di calore verso destra tanto più accentuata al diminuire dello spessore. Il fenomeno si fa via via più marcato nel prosieguo dell'evoluzione temporale.

Considerando lo spot centrale sul gradino, come nel caso sperimentale, non si osservano sostanziali differenze se non uno shift verso destra.

Il caso del doppio spot, uno interno all'altro, viene utilizzato per effettuare un 'refinement' dell'area appena al di fuori dello spot vero è proprio. Anche in questo caso si osserva lo stesso fenomeno di migrazione del calore. In questa situazione, le differenze in gioco non giustificano l'aumentato peso computazionale. Le considerazioni effettuate in questa fase permettono di comprendere un fenomeno difficilmente visualizzabile direttamente dal termogramma e molto complesso da ricostruire per punti senza una conoscenza a priori.

Individuate le aree interessate dalla sorgente termica operiamo una mesh selettiva. Accanto agli elementi quadrangolari della zona interessata dalla sorgente termica e sottoposta a gradienti significativi, si opera un diradamento sugli spessori maggiori della scaletta visto che non sono minimamente interessati da influenze termiche. Si riporta la mesh così definita pronta per essere usata nei passaggi successivi.

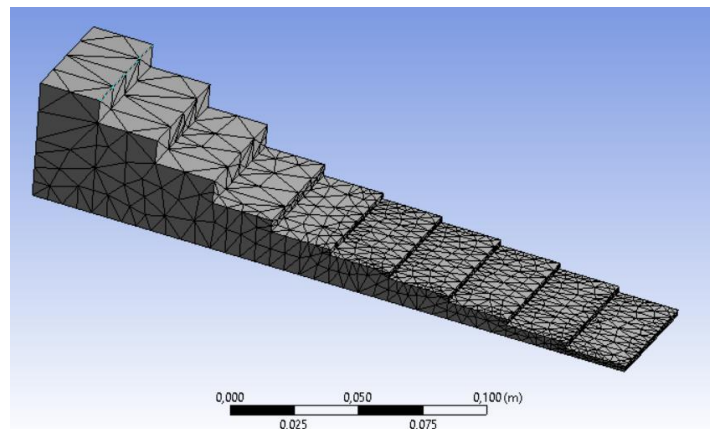


Figura 68 Scaletta mesh di prima ipotesi

4.5.3 ANALISI QUANTITATIVA

Le prove sperimentali elaborate nel capitolo 3.4 sono state effettuate mediante tecnica termografica attiva di tipo ottico con forzante laser. Per poter modellare con elementi finiti tale tecnica si opera il settaggio dei parametri. Le proprietà del materiale sono quelle riportate nel paragrafo Ansys thermal analysis.

I dati provenienti dalle prove di laboratorio sono:

- Emissività, pari a 0,5
- Temperatura ambiente
- Distanza dalla sorgente laser, incide sull'area interessata dal fascio laser
- Potenza e tempo di esecuzione del laser.

I dati necessari al software per il calcolo non esplicitamente noti sono stati oggetto di stima. È il caso del film coefficient necessario per la convezione.

Settaggio nel setup di Ansys:

- Radiation: si riporta il valore di emissività pari a 0,5
- Initial temperature: temperatura ambiente di 21,7° e 22,8°
- Settaggio dei tempi per permettere il successivo inserimento della forzante
- Convection: inserimento del parametro film coefficient, in prima fase costante
- Heat Flow: aggiunta su tabella dei tempi

Si riportano gli andamenti in riscaldamento e transitorio di raffreddamento per gli spessori a 2,5 e 10,04 mm.

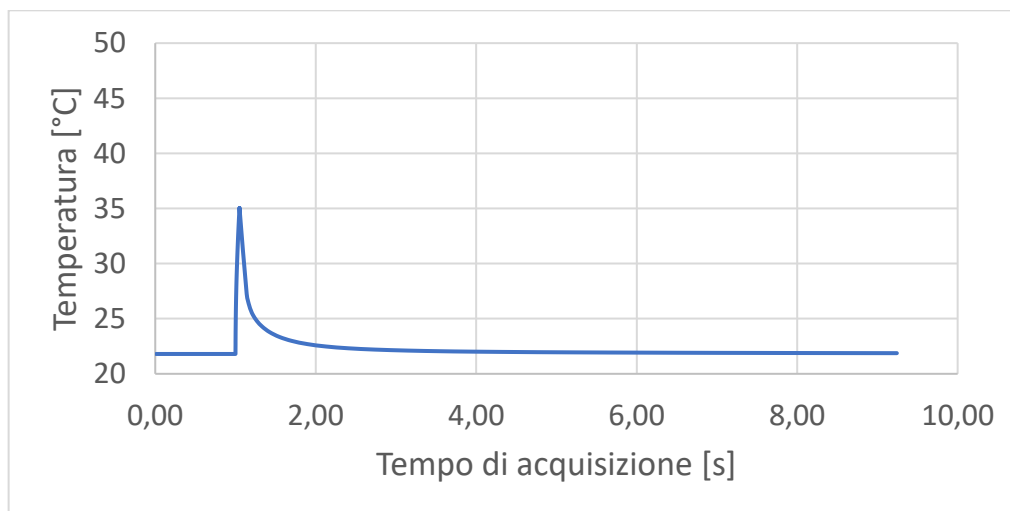


Figura 69 Andamento temperatura gradino 2,5 mm, Ansys

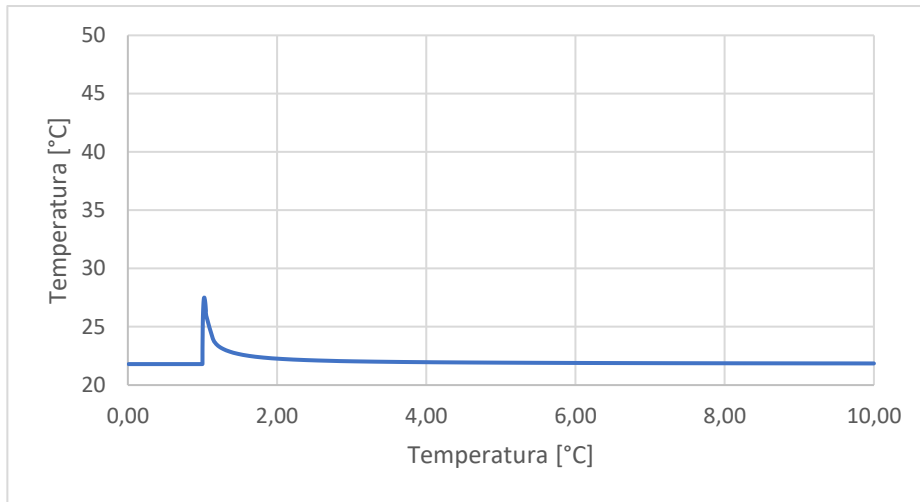


Figura 70 Andamento temperatura scalino 10,04 mm, Ansys

Da notare è il fatto che il rapporto relativo dei due andamenti rimane pressoché invariato rispetto al caso sperimentale, con la T max più alta sullo spessore inferiore. Tali valori numerici risultano però notevolmente inferiori a quelli registrati dal caso reale.

4.5.3.1 Sensitività modello numerico ai parametri di ingresso

Questa analisi viene effettuata per capire l'effetto dei parametri inseriti manualmente nel software sul risultato finale, l'andamento di temperatura. Ogni parametro è fatto variare tenendo costanti gli altri. Si riporta la tabella riepilogativa con le prove effettuate sullo spessore 10,04 mm.

Tabella 11 Analisi sensitività modello Ansys

densità [kg/m ³]	T [°]	K [w/(mC)]	T [°]	C [J/(kgC)]	T [°]
7850	27,512	60	27,512	434	27,512
8000	27,463	50	28,131	444	28,938
8400	27,337	40	28,938	460	28,747

Si può evincere la poca sensibilità alla densità; più influenti sulla variazione di temperatura sono la conduttività termica ed il calore specifico. Si tratta in entrambi i casi di differenze poco importanti. Non è riportato il 'film coefficient' vista la bassissima influenza riscontrata anche imponendo variazioni importanti.

Pur effettuando una taratura dei parametri inseriti in input non si riscontrano variazioni significative, con l'errore rispetto ai dati sperimentali che rimane elevato. Riportiamo la tabella 12 per il confronto.

Tabella 12 Confronto temperature massime sperimentali e numeriche, prima ipotesi

		TEMPERATURA MASSIMA SPERIMENTALE [°]	TEMPERATURA MASSIMA FEM [°]
Spessore 2,5	Test_1	44,99	35,05
	Test_2	45,82	
Spessore 10,04	Test_3	38,87	28,88
	Test_4	38,91	

Si evince che gli scostamenti sono nell'ordine del 25% e del 28% rispettivamente sullo spessore 10,04 mm e 2,5 mm.

Si procede ad un ulteriore raffinamento del modello. Si applicano a tutto il provino elementi di tipo quadrangolare con un infittimento lungo lo spessore molto più spinto. Vista la velocità del fenomeno in atto, si parte da elementi della dimensione di 0,1 mm lungo la superficie. Si riporta in figura 71 quanto effettuato.

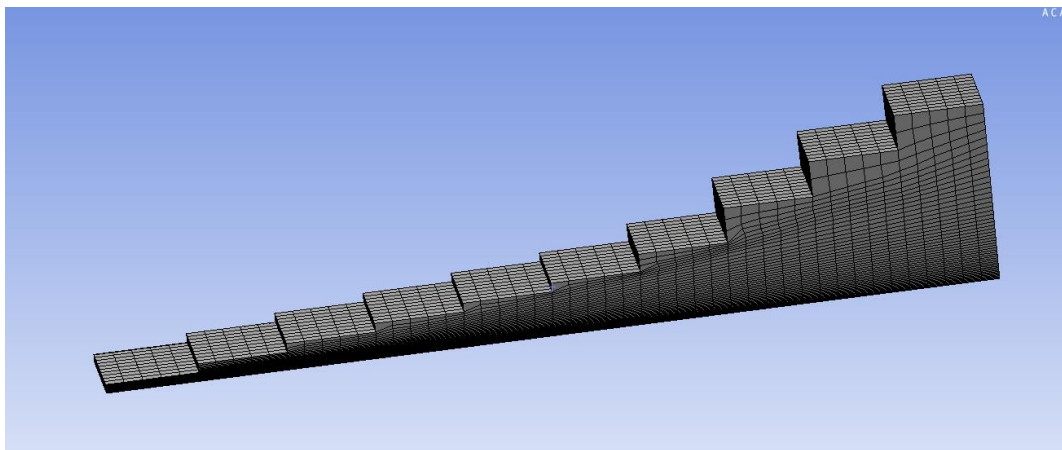


Figura 71 Mesh elementi quadrangolari con raffinamento lungo lo spessore

La mesh diventa molto più lasca in maniera esponenziale sia lungo lo spessore che verso spessori più elevati non di interesse in questa analisi. Per la risoluzione del problema di queste dimensioni avremmo uno sforzo computazionale troppo elevato, andando ad effettuare simulazioni anche dove non necessario. Per tale motivo si modifica la geometria 'tagliando' la scaletta ai primi cinque gradini, figura 72.

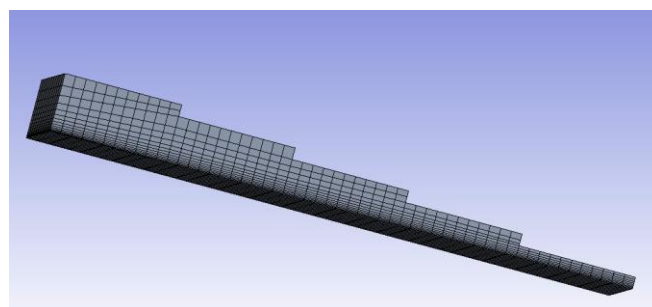


Figura 72 Mesh modello semplificato a 5 gradini

Per meglio comprendere l'infittimento si riporta un dettaglio in figura 73.

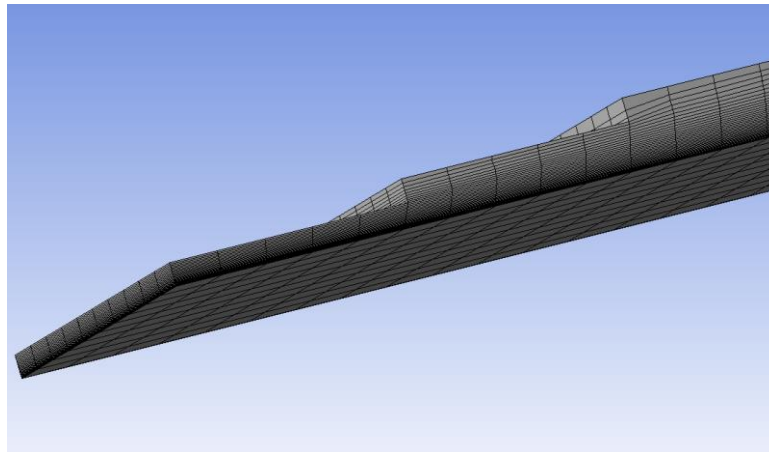


Figura 73 Dettaglio infittimento mesh lungo lo spessore

Giunti in questa fase si ripetono tutte le operazioni descritte in precedenza relativamente all'inserimento dei dati per la simulazione. Si riportano i dati finali estratti dalle simulazioni, in particolare dal nodo centrale in tabella 13.

Tabella 13 Confronto temperature massime sperimentali e numeriche mesh quadrangolare

		TEMPERATURA MASSIMA SPERIMENTALE [°]	TEMPERATURA MASSIMA FEM [°]
Spessore 2,5	Test_1	44,99	39,48 °C
	Test_2	45,82	
Spessore 10,04	Test_3	38,87	31,19 °C
	Test_4	38,91	

Si evince dalla tabella un deciso avvicinamento della curva sperimentale e simulata mediante elementi finiti. Si è passati ad errori decisamente più contenuti nell'ordine del 12% e 15% rispettivamente per spessori di 2,5 mm e 10,04 mm.

Si riportano le evoluzioni complete di riscaldamento e raffreddamento in funzione del tempo.

4.6 ERRORE EMISSIVITA'

Questa sezione risulta essere un paragrafo a sé stante rispetto al flusso della trattazione. Viene descritta una problematica in cui si è incorsi non a valle, così come viene presentata, ma nella prima parte dell'analisi. Nella precedente sezione 'elaborazione dei dati sperimentali' sono state riportate le evoluzioni termiche dei due provini scaletta in acciaio e alluminio. Esaminando per la prima volta il dato grezzo estratto dal termogramma tramite il software Irt, sempre relativamente al pixel centrale dello spot del laser, si è giunti ad una contraddizione riguardo i valori massimi di temperatura. La

discordanza era presente sui due test relativi allo spessore 10,04 mm , fuori scala rispetto alle altre misurazioni. Non di minore importanza l'effetto sul comportamento fisico, a parità di energia fornita si raggiungevano temperature più elevate su spessori maggiori. Per capire dove fosse l'errore per cui si incappava in questo assurdo fisico si è proceduto con le analisi descritte in 2 e 3 del capitolo lasciando in stand by momentaneamente l'obiettivo della tesi.

Si riporta il grafico dei test oggetto di revisione in figura 74.



Figura 74 *evoluzione temperatura con emissività sbagliata*

I valori massimi si trovavano nel range 90,4 ° e 94,8°, decisamente fuori scala.

Avuta la conferma dell'errore, si è ripetuta l'estrazione della prova resettando e reinserendo da zero tutti i dati necessari. Le nuove simulazioni hanno corretto l'errore. Il focus si è quindi spostato su cosa fosse stato sbagliato in precedenza. L'attenzione è caduta sull'emissività, vista l'elevata differenza riscontrata sulla temperatura. Con un valore 0.3 al posto di 0.5 specifico per il problema si ricade proprio nel grafico di figura 74. Un errore che può sembrare piccolo ha comportato un notevole effetto sull'output finale.

Nel prossimo capitolo vengono presentate le considerazioni finali.

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro di Tesi ha analizzato la tecnica della termografia attiva su spessori a sezione variabile, prendendo in esame prove sperimentali e modelli analitici e numerici. Tra le famiglie di tecniche termografiche, si è lavorato con la 'pulsed thermography' (PT) di tipo ottico vista la strumentazione dedicata presente presso il Politenico. Tale tecnica permette di avere un approccio quantitativo, e non solo qualitativo, al problema.

Nel capitolo 1, relativo allo stato dell'arte, si è riportato tutto il materiale consultato per poter compiere i successivi sviluppi, dall'identificazione della tecnica fino agli studi pregressi su componenti riconducibili a quelli oggetto di tesi. Si è proceduto nella parte 2, Materiali e Metodi, a descrivere la strumentazione e la logica dietro al suo uso. Si sono forniti i dati ed i set up, necessari non solo per l'ottenimento del segnale di temperatura in ambito sperimentale ma anche per la caratterizzazione di modelli analitici ed agli elementi finiti. Il cuore della trattazione avviene nel capitolo 3, elaborazioni e analisi dati, dove si riportano le elaborazioni sviluppate secondo l'ordine con cui sono state ottenute. Alla luce dei risultati realizzati, si può concludere che è stato trovato un match tra numerico e sperimentale relativamente alla trattazione di problemi termografici di tipo attivo con logica pulsed. Lo stesso si può dire considerando campo analitico e sperimentale limitandosi però alle sole forzanti uniformi sulle superfici oggetto di indagine. Un errore del 12% e 15% rientra nel normale range di variabilità tipico dei problemi che coinvolgono dati numerici e dati sperimentali.

Il software Irtax ha permesso di ottenere un output facilmente trattabile per le successive analisi Matlab. Quest'ultimo strumento ha rivestito una notevole importanza per la caratterizzazione dei modelli analitici e per lo sviluppo di grafici di confronto. Si conclude con il solutore Ansys, tool thermal transient, usato per lo sviluppo di modelli agli elementi finiti: unitamente all'interfaccia semplificata per l'inserimento dei dati, necessari alle simulazioni numeriche, è da mettere in risalto la modularità di questo tool, che permette di utilizzare mesh o setup specifici su più modelli.

Per finire, si propongono degli spunti per un prosieguo di quanto fatto in questo elaborato. Le indagini effettuate sperimentalmente sono state di tipo statico ovvero i due spot su cui viene imposto il riscaldamento non sono varianti ma fissi. Sviluppo naturale comporta il passaggio ad una logica dinamica dove il fascio laser si sposta tra i due spot in un certo intervallo di tempo. Rimanendo in ambito statico si può particolareggiare il problema prendendo in esame altri materiali o rivestimenti superficiali sottili.

6 BIBLIOGRAFIA

Si riportano i riferimenti ai documenti ed ai siti consultati per lo svolgimento del presente elaborato di Tesi.

- [1] Siavash Doshvarpassand, Changzhi Wu, Xiangyu Wang, An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, Volume 96, 2019, Pages 366–389, ISSN 1350-4495, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.006>
- [2] C. Meola, *Infrared Thermography Recent Advances and Future Trends*, Bentham Science Publishers, 2012.
- [3] ASTM, Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers.
- [4] ASTM, Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.
- [5] ISO, Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography – Part 1: General procedures, in ISO 18434-1.
- [6] M. Saintey, D. Almond, *An artificial neural network interpreter for transient thermography image data*, *NDT & E Int.* 30 (5) (1997) 291–295
- [7] W. Parker, et al., *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity*, *J. Appl. Phys.* 32 (9) (1961) 1679–1684
- [8] 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).
- [9] DES. Manuale: Multides system laser - (www.desinnovation.com).
- [10] FLIR: “X6540sc – X6550sc”, User Manual, DC084U, Version D (2013)
- [11] Caratterizzazione dei materiali mediante termografia attiva, Luca Corsano, Politecnico di Torino, 2019

- [12] Diagnostic Engineering Solutions S.r.l.: "MultiDES System Laser", Manuale (2017)
- [13] Uso della termografia attiva per l'analisi di giunti saldati RSW, Raffaele Zarrillo, Politecnico di Torino, 2020
- [14] C. Meola, G.M. Carlomagno: "Recent advantages in the use of infrared thermography", Measurement Science and Technology 15 (2004) R27-R58
- [15] https://www.math.unipd.it/~marcuzzi/DIDATTICA/LEZ&ESE_PIAI_Matematica/termografia_3.pdf
- [16] Ansys inc.
- [17] *D.P. Almond, S.G. Pickering, An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit, J. Appl. Phys. 111 (9) (2012) 093510.*
- [18]
https://www.math.unipd.it/~marcuzzi/DIDATTICA/LEZ&ESE_PIAI_Matematica/termografia_4.pdf