

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione sperimentale di materiali per trazione elettrica



Relatrice:

Francesca Maria Curà

Candidato:

Giampiero Carlucci

Correlatori:

Raffaella Sesana

Luca Corsaro

Tutor aziendale:

Marie Marguerite Dugand

Anno accademico 2021/2022





Abstract

Al giorno d'oggi, con la riduzione dei combustibili fossili sotterranei e l'aumento dell'inquinamento ambientale causato dalla loro combustione, i veicoli elettrici stanno diventando sempre più attraenti e popolari. Essi si sono sviluppati rapidamente come mezzo di trasporto alternativo a causa dei numerosi vantaggi: nessun inquinamento, bassa rumorosità, alta efficienza e convenienza. Come fonte principale di alimentazione i veicoli elettrici sfruttano le batterie elettriche, inserite opportunamente in uno specifico pacco batteria. La ricerca presente nel seguente lavoro di tesi, svolta in collaborazione con il Centro Ricerche Fiat S.C.p.A., presenta come obiettivo la caratterizzazione sperimentale di quattro diverse famiglie di materiali impiegati nei pacchi batteria, più precisamente utilizzati come divisorio tra due celle oppure come protezione dell'elettronica presente. Lo studio sperimentale dei suddetti materiali si concentra sull'applicazione della tecnica di "termografia pulsata" (PT), in cui il campione ispezionato viene stimolato da un impulso di calore attraverso una specifica fonte di alimentazione (laser) per una durata di tempo limitata con conseguente registrazione della variazione di temperatura sulla superficie del campione stesso attraverso una termocamera. Per ciascun materiale indagato alla temperatura ambiente, a valle di ogni prova, è possibile registrare le informazioni in termini di temperatura al variare del tempo e identificare, attraverso le indicazioni presenti in normativa, il valore di diffusività termica. A partire dalla diffusività termica si stima la conducibilità termica, parametro considerato come indice di prestazione nel confronto tra i numerosi materiali che verranno analizzati. In un secondo momento la procedura precedentemente descritta verrà nuovamente applicata ai vari materiali dopo aver preriscaldato i singoli provini in un forno a Muffola. In tal modo sarà possibile analizzare il comportamento di ciascun campione ad un valore di temperatura diverso da quello ambiente e studiare inoltre come cambia la conducibilità termica al variare della temperatura. Per definire ed impostare i parametri dell'impulso laser per ciascuna prova verrà utilizzato il software Multides, mentre per gestire correttamente i dati estrapolati dalla termocamera verrà utilizzato il software ResearchIR. Dal seguente software è possibile esportare i file in formato ".csv" in ambiente Matlab per un'adeguata manipolazione dei dati raccolti. Dopo aver concluso lo studio sperimentale con l'identificazione dei risultati di interesse, sarà proposto un modello simulato che consentirà di ottenere degli andamenti di temperatura ipotizzando di modellare delle prove di termografia attiva. In tal senso, verranno confrontati gli andamenti sperimentali ottenuti per una specifica famiglia di materiali con gli andamenti simulati ricavati dal modello, in modo da poter sottolineare da un lato la bontà del modello stesso e dall'altro, la possibile applicabilità ad una vasta gamma di materiali sottoposti a prove sperimentali in termografia attiva.





Sommario:

Capitolo 1	1
Introduzione	1
1.1 Batterie elettriche	2
1.2 Thermal management system	3
1.2.1 Phase change materials (PCM)	5
1.2.2 Tipologie di PCM	6
Capitolo 2	7
Stato dell'arte: Termografia	7
2.1 Termografia attiva	7
2.1.1 Termografia Pulsata	8
2.1.2 Termografia Lock-in	9
2.2 Il corpo nero	10
2.3 Il corpo grigio	11
2.4 Equazione del calore	12
Capitolo 3	14
Strumentazione di laboratorio	14
3.1 Termocamera	15
3.2 Laser	17
3.3 Porta campione	19
3.3.1 Soluzione iniziale	20
3.3.2 Soluzione finale	20
3.4 Forno a Muffola	21
3.5 Analisi dei dati sperimentali	21
Capitolo 4	25
Alcen paper Denka	25
4.1 Indagine preliminare	25
4.1.1 Analisi al microscopio	26
4.1.2 Analisi della trasmittanza	28
4.2 Studio a temperatura ambiente	29
4.2.1 Campione t3	30
4.2.2 Campione t2	34
4.3 Studio in temperatura	36
4.3.1 Campione t3	37
4.3.2 Campione t2	39
4.3.3 Andamenti di conducibilità termica	40
4.4 Osservazioni	41
Capitolo 5	42



ITW Formex	42
5.1 Studio a temperatura ambiente.....	42
5.2 Studio in temperatura.....	46
5.3 Osservazioni.....	48
Capitolo 6	49
Stokvis GY	49
6.1 Studio a temperatura ambiente.....	49
6.2 Studio in temperatura.....	54
6.3 Osservazioni.....	57
Capitolo 7	58
Busbar batteries 520-PHEV	58
7.1 PVC BB flessibile	58
7.1.1 Studio a temperatura ambiente	59
7.1.2 Osservazioni.....	62
7.2 Guaina campione 1.....	63
7.2.1 Studio a temperatura ambiente	63
7.2.2 Osservazioni.....	67
7.3 Nastro	68
7.3.1 Studio a temperatura ambiente	68
7.3.2 Osservazioni.....	71
7.4 Confronto tra i campioni	71
Capitolo 8	73
Modello termografico	73
8.1 Valutazione termodinamica	73
8.1.1 Scambio termico per conduzione	74
8.1.2 Scambio termico per convezione.....	74
8.2 Indagine del modello.....	75
8.2.1 Modello equivalente.....	76
8.2.2 Modello effettivo.....	77
8.3 Analogia elettrica	77
8.3.1 Modello con resistenze.....	78
8.3.2 Andamento di temperatura	79
8.4 Funzione \dot{Q}	80
8.4.1 Prima soluzione.....	80
8.4.2 Seconda soluzione.....	81
8.4.3 Forma funzionale $Q(t)$	82
8.4.4 Coefficienti e fattori correttivi	84
8.5 Andamenti sperimentali e simulati.....	86
8.5.1 Ricostruzione prove con andamenti regolari	86
8.5.2 Ricostruzione prove con picco iniziale.....	94
8.5.3 Mappatura coefficienti e fattori correttivi.....	97
Capitolo 9	102

Conclusione e sviluppi futuri..... 102

Indice delle figure:

Figura 1: Previsioni delle vendite degli autoveicoli fino al 2030	1
Figura 2: Comportamento delle batterie agli ioni di litio al variare della temperatura	2
Figura 3: Potenza di una batteria in funzione della temperatura	3
Figura 4: Ciclo vita di una batteria in funzione della temperatura	3
Figura 5: Tipologie di tecniche previste dal TMS	4
Figura 6: Materiali per il TMS	4
Figura 7: Schema di una matrice PCM	5
Figura 8: Effetto dei PCM sulla temperatura massima e minima delle batterie	6
Figura 9: Metodi di termografia attiva	8
Figura 10: Esempio di termografia pulsata con sistema in riflessione	8
Figura 11: Esempio di termografia Lock-in con sistema in riflessione	9
Figura 12: Spettro elettromagnetico e divisione dei flussi di calore.....	10
Figura 13: Confronto tra corpo nero e corpo grigio	11
Figura 14: Schema funzionale del sistema	14
Figura 15: Banco prova presente in laboratorio	15
Figura 16: Termocamera Flir X6540sc	15
Figura 17: Impostazione preliminare dei parametri della Termocamera	16
Figura 18: Definizione del frame rate	16
Figura 19: Posizionamento corretto dell'inquadratura.....	17
Figura 20: Laser presente in laboratorio.....	17
Figura 21: Schermata iniziale Multides.....	18
Figura 22: Schermata Control Multides	18
Figura 23: Schermata Laser Multides	19
Figura 24: Soluzione iniziale per il porta campione.....	20
Figura 25: Soluzione finale per il porta campione.....	20
Figura 26: Forno a Muffola presente in laboratorio	21
Figura 27: Schema logico relativo all'analisi dei dati sperimentali	22
Figura 28: Evoluzione della temperatura in funzione del tempo	23
Figura 29: Immagini SEM campione t3	26
Figura 30: Spettro EDS rappresentativo del campione.....	26
Figura 31: Condizioni di partenza per l'indagine.....	27
Figura 32: Analisi semi-quantitativa con risultati espressi in percentuale [%].....	27
Figura 33: Valutazione della trasmittanza dei tre campioni	28
Figura 34: Fogli di Alcen paper Denka	29
Figura 35: Bomboletta spray per annerire i campioni	29
Figura 36: Campione t3 annerito 14,65x14,04x3 mm	30
Figura 37: Andamenti di temperatura relativa per il campione t3	31
Figura 38: Calore specifico Alcen paper Denka.....	32
Figura 39: Conducibilità termica Alcen Denka.....	33
Figura 40: Campione t3 annerito 14,39x13,65x2 mm	34
Figura 41: Andamenti di temperatura relativa per il campione t2	35
Figura 42: Caratterizzazione termica del campione t3	38
Figura 43: Pirometro per monitoraggio della temperatura del campione	38
Figura 44: Caratterizzazione termica del campione t3	40
Figura 45: Confronto degli andamenti di conducibilità termica.....	40
Figura 46: Foglio di ITW Formex.....	42
Figura 47: Campione ITW Formex 14,21x13,71x0,8 mm	43
Figura 48: Calore specifico ITW Formex	44
Figura 49: Andamenti di temperatura relativa per il campione ITW Formex 10ms.....	45
Figura 50: Andamenti di temperatura relativa per il campione ITW Formex 5ms.....	45
Figura 51: Massima temperatura a cui resiste un ITW Formex.....	46
Figura 52: Campioni ITW danneggiati alle elevate temperature.....	47
Figura 53: Caratterizzazione termica del campione ITW Formex.....	48

Figura 54: Foglio di Stokvis GY	49
Figura 55: Campione Stokvis GY 14,53x14,33x3,67 mm	50
Figura 56: Calore specifico Stokvis GY	51
Figura 57: Andamenti di temperatura relativa per il campione Stokvis GY 10ms	51
Figura 58: Andamenti di temperatura relativa per il campione Stokvis GY 5ms	52
Figura 59: Effetti dell'aumento della potenza laser	52
Figura 60: Conducibilità termica poliolefine	53
Figura 61: Massima temperatura a cui resiste uno Stokvis GY	54
Figura 62: Caratterizzazione termica del campione Stokvis GY	56
Figura 63: Andamento di conducibilità termica	56
Figura 64: Materiale PVC flessibile BB	58
Figura 65: Campione PVC BB flessibile 14, 66x14,06x1,13 mm	59
Figura 66: Andamenti di temperatura relativa per il campione PVC flessibile 5ms	60
Figura 67: Calore specifico materiali in PVC	61
Figura 68: Conducibilità termica simile al PVC BB flessibile	62
Figura 69: Materiale Guaina Campione 1	63
Figura 70: Campione Guaina campione 1 14,3x14,52x1,65 mm vista anteriore	63
Figura 71: Campione Guaina campione 1 14,3x14,52x1,65 mm vista posteriore	64
Figura 72: Andamenti di temperatura relativa per il campione Guaina campione 1 10ms	65
Figura 73: Andamenti di temperatura relativa per il campione Guaina campione 1 5ms	65
Figura 74: Conducibilità termica simile a Guaina campione 1	66
Figura 75: Superficie interna Guaina campione 1	67
Figura 76: Materiale nastro	68
Figura 77: Campione nastro 13,76x14,48x0,54 mm	68
Figura 78: Andamenti di temperatura relativa per il campione Nastro 5ms	70
Figura 79: Temperature massime campioni in PVC	72
Figura 80: Scambio termico per conduzione	74
Figura 81: Scambio termico per convezione	75
Figura 82: Schema del modello equivalente	76
Figura 83: Schema del modello effettivo	77
Figura 84: Schema dell'analogia elettrica	78
Figura 85: Analogia elettrica applicata al caso di studio	79
Figura 86: Applicazione della seconda soluzione	81
Figura 87: Andamento dei fattori correttivi	85
Figura 88: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 t2	87
Figura 89: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 2 t2	87
Figura 90: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 3 t2	88
Figura 91: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 4 t2	88
Figura 92: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 5 t2	89
Figura 93: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 6 t2	89
Figura 94: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 t3	90
Figura 95: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 2 t3	91
Figura 96: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 3 t3	91
Figura 97: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 4 t3	92
Figura 98: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 5 t3	92
Figura 99: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 6 t3	93
Figura 100: Incremento di temperatura su grafico normalizzato	95
Figura 101: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 Stokvis	96
Figura 102: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 Stokvis metodo delle aree	96
Figura 103: Analisi dell'andamento dei coefficienti	97
Figura 104: Andamenti fattore correttivo ϕ	98
Figura 105: Andamento η al variare dello spessore	101

Indice delle tabelle:

Tabella 1: Campioni Alcen Denka disponibili	25
Tabella 2: Parametri della termocamera Alcen Denka	30
Tabella 3: Dati campione t3	31



Tabella 4: Proprietà termiche campione t3.....	33
Tabella 5: Dati campione t2.....	34
Tabella 6: Proprietà termiche campione t2.....	35
Tabella 7: Dati campione t3 in temperatura.....	37
Tabella 8: Proprietà termiche campione t3 in temperatura.....	37
Tabella 9: Dati campione t2 in temperatura.....	39
Tabella 10: Proprietà termiche campione t2 in temperatura.....	39
Tabella 11: Parametri della termocamera ITW Formex.....	43
Tabella 12: Dati campione ITW Formex.....	44
Tabella 13: Proprietà termiche campione ITW Formex.....	46
Tabella 14: Dati campione ITW Formex in temperatura.....	47
Tabella 15: Parametri della termocamera Stokvis GY.....	50
Tabella 16: Dati campione Stokvis GY.....	50
Tabella 17: Proprietà termiche campione Stokvis GY.....	53
Tabella 18: Dati campione Stokvis GY in temperatura.....	55
Tabella 19: Proprietà termiche Stokvis GY in temperatura.....	55
Tabella 20: Campioni Busbar batteries 520-PHEV disponibili.....	58
Tabella 21: Parametri della termocamera PVC BB flessibile.....	59
Tabella 22: Dati campione PVC BB flessibile.....	60
Tabella 23: Proprietà termiche PVC BB flessibile.....	61
Tabella 24: Parametri della termocamera Guaina campione 1.....	64
Tabella 25: Dati campione Guaina campione1.....	64
Tabella 26: Proprietà termiche Guaina campione 1.....	66
Tabella 27: Parametri della termocamera del Nastro.....	69
Tabella 28: Dati campione Nastro.....	69
Tabella 29: Proprietà termiche Nastro.....	70
Tabella 30: Confronto valori di conducibilità campioni in PVC.....	71
Tabella 31: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione t2.....	90
Tabella 32: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione t3.....	93
Tabella 33: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione Stokvis.....	97
Tabella 34: Raccolta valori φ al variare della potenza laser.....	99
Tabella 35: Valutazione dei coefficienti di correlazione.....	99
Tabella 36: Media e deviazione standard dei gruppi φ	99
Tabella 37: Media e deviazione standard della potenza laser.....	100
Tabella 38: Valutazione degli scarti su φ	100
Tabella 39: Valutazione degli scarti sulla potenza laser.....	100
Tabella 40: Valutazione della covarianza e della correlazione.....	100

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni il tema relativo alle auto elettriche continua a registrare un aumento di interesse considerevole. Nel 2021, i veicoli a batteria hanno rappresentato circa il 20% delle vendite di auto nuove. In particolar modo, nei cinque principali mercati: Francia, Germania, Italia, Spagna e Regno Unito, la quota di mercato dei veicoli elettrificati (quindi, anche full e plug-in hybrid) è passata dall'8% del 2019 al 38% del 2021. La tendenza permette di ipotizzare degli scenari che vedono il “sorpasso” delle immatricolazioni di veicoli elettrici e plug-in hybrid su quelli diesel già a partire dalla prima metà del 2023. Le seguenti condizioni sono una diretta conseguenza degli obiettivi imposti dall'Unione Europea nel 2018, circa la necessità di ridurre le emissioni dei gas serra provenienti dai veicoli stradali del 90% entro il 2050, partendo dal 1990. Come è spiegato in [1] l'aumento del costo dei combustibili fossili, normative ambientali molto rigide sulle emissioni di questi tipi di combustibili e l'alto costo di esaurimento dei motori a combustione interna hanno portato a un aumento generale tra consumatori. Questo li ha incoraggiati ad acquistare veicoli più moderni e ibridi. In Figura 1, è possibile vedere chiaramente la crescita della popolarità dei nuovi veicoli nei prossimi anni:

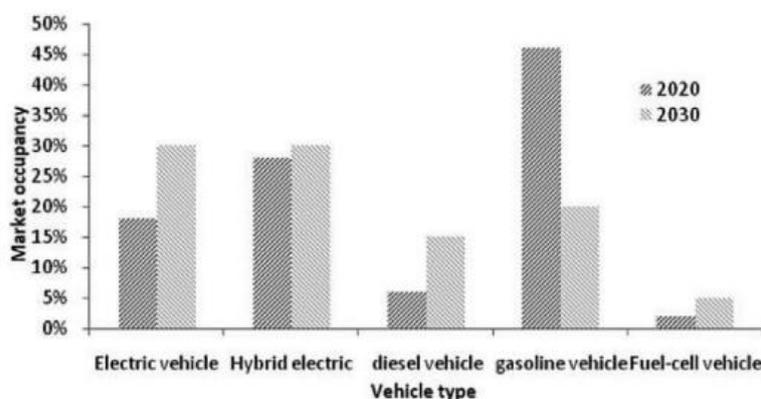


Figura 1: Previsioni delle vendite degli autoveicoli fino al 2030

1.1 Batterie elettriche

Di recente, come riportato in [1], una delle principali preoccupazioni dell'elettrico è stata l'identificazione di una fonte di energia affidabile e conveniente. Le batterie agli ioni di litio sono di ottimo interesse a causa:

- Costo relativamente basso;
- Densità di energia relativamente elevata;
- Maggiore durata.

Il problema principale con le seguenti batterie è associato alla generazione di calore durante la scarica nei veicoli elettrici. Poiché le celle presenti nel pacco batteria non sono ad alta energia, per usarle in modo opportune, risulta necessario prevedere una rete in serie o in parallelo per fornire l'energia sufficiente. L'insieme delle suddette batterie e conseguentemente il loro utilizzo produce una grande quantità di calore. Se tale calore non viene adeguatamente gestito, può portare a dei problemi non trascurabili come mostrato in Figura 2:

Battery cell temperature	Cause	Leads to	Effect
 High	Electrolyte decomposition	Irreversible lithium loss	Capacity fade
	Continuous side reactions at low rate	Impedance Rise	Power fade
	Decrease of accessible anode surface for Li-ion intercalation		
	Decomposition of binder	Loss of mechanical stability	Capacity fade
25 °C – 40 °C	Maximum cycle life		
15 °C – 24 °C	Superior energy Storage capacity		
 Low	Lithium plating	Irreversible loss of lithium	Capacity/ power fade
	Electrolyte decomposition	Electrolyte loss	

Figura 2: Comportamento delle batterie agli ioni di litio al variare della temperatura

Come riportato in [2] e in [3], i ricercatori che lavorano nel settore delle batterie suggeriscono un intervallo di temperatura ottimale per questi tipi di batterie tra 20°C e 40°C. Infatti, le Figure 3 e 4 riportare in seguito consentono di capire come la temperatura di esercizio incida direttamente sulla durata e sulla potenza di una batteria:

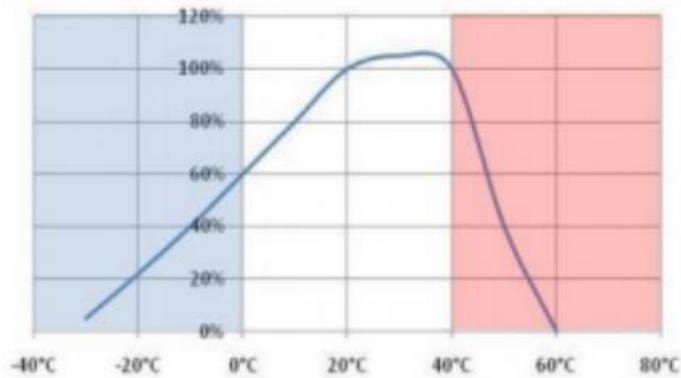


Figura 3: Potenza di una batteria in funzione della temperatura

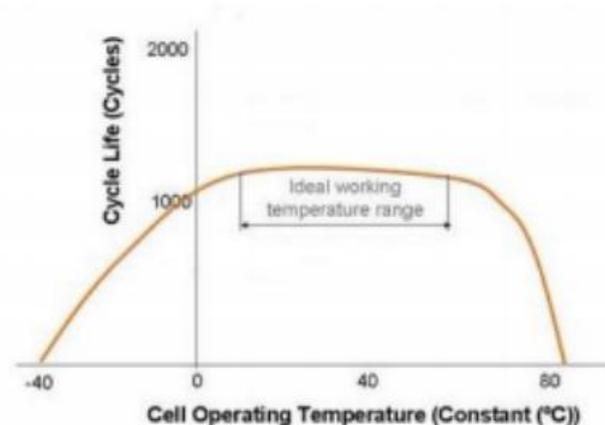


Figura 4: Ciclo vita di una batteria in funzione della temperatura

Inoltre, considerando che ogni cella del pacco batteria può avere temperature diverse da altre celle, per evitare problemi di disequilibrio termico risulta necessario individuare delle soluzioni che permettano di garantire elevate efficienze del sistema.

1.2 Thermal management system

Negli ultimi anni, numerose strategie sono state studiate da vari gruppi di ricerca in tutto il mondo per rimuovere facilmente il calore da un pacco batteria. In particolare, si parla di “Thermal management system”, ossia un insieme di strategie obbligatorie per i sistemi a batteria agli ioni di litio ad alte temperature di esercizio. Come riportato in [3] ci sono due scopi principali del sistema di gestione termica della batteria :

1. Mantenimento delle batterie in condizioni di funzionamento ottimali miglioramento delle prestazioni elettriche e della durata di una batteria;
2. Prevenire la dissipazione del calore e migliorare la sicurezza.

Come dettagliatamente scritto in [2] sono numerose le tecniche esistenti. Di seguito è riportato uno schema riassuntivo delle varie strategie in Figura 5:

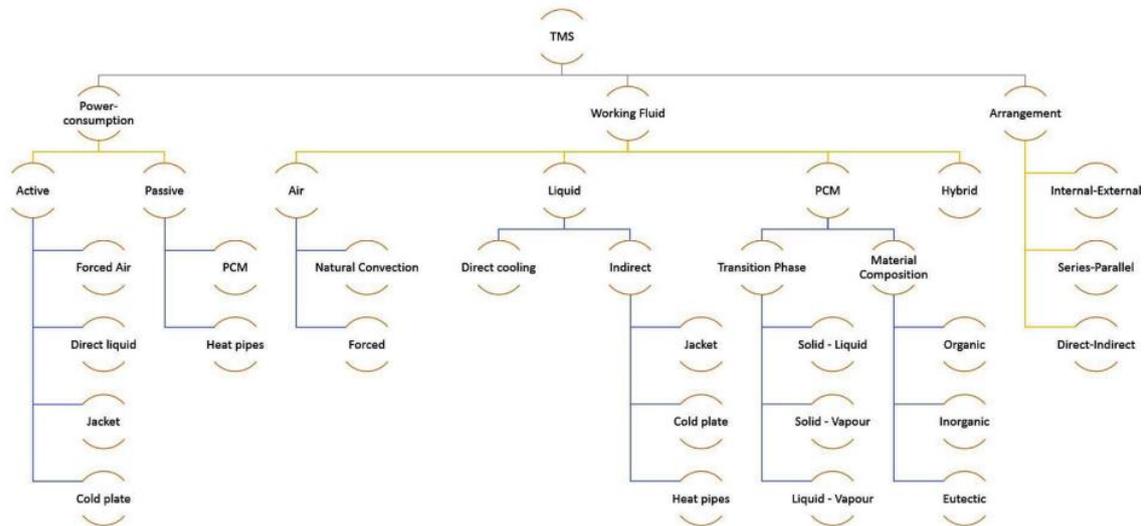


Figura 5: Tipologie di tecniche previste dal TMS

Pertanto, l'obiettivo principale di questo lavoro è quello di esplorare i diversi materiali disponibili per il TMS e applicarli ai veicoli elettrici. In Figura 6 è riportato uno schema che indica le diverse tipologie di materiali e la loro rispettiva applicazione in corrispondenza di un pacco batterie:

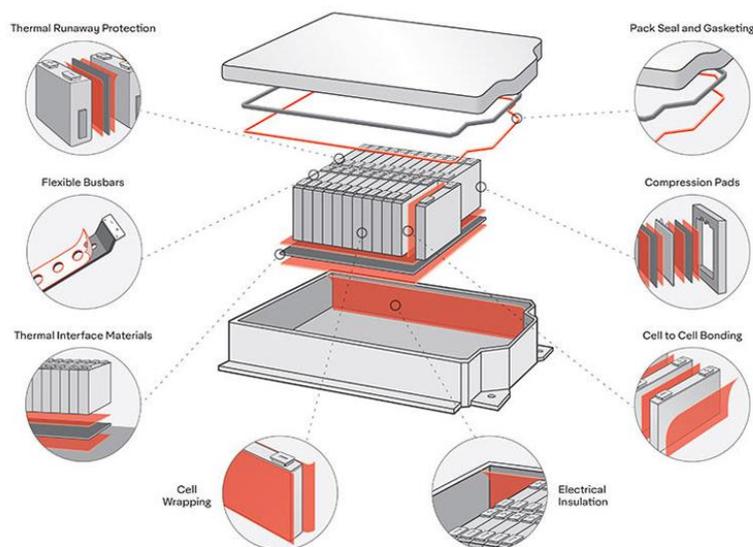


Figura 6: Materiali per il TMS

1.2.1 Phase change materials (PCM)

Dato che il seguente lavoro di tesi si concentra sulla caratterizzazione sperimentale di materiali impiegati nel pacco batteria, può essere interessante focalizzare l'attenzione su una specifica strategia presente nell'albero del TMS riportato in Figura 5: il PCM. Come spiegato in [4], tale soluzione prevede una matrice di materiali a cambiamento di fase (PCM) nella quale sono poste celle della batteria, in cui si registrano delle trasformazioni di fase solido-liquido di materiali organici/inorganici/eutettici. Un esempio di schematizzazione è riportato in Figura 7:

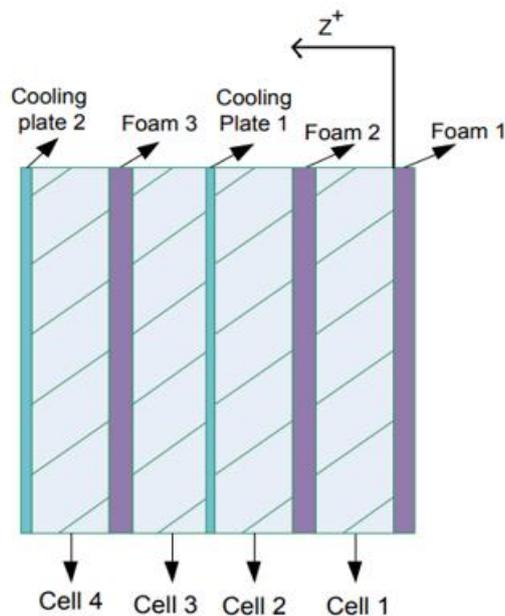


Figura 7: Schema di una matrice PCM

Il sistema studiato è un sotto modulo comprendente quattro celle agli ioni di litio. Tra le celle sono presenti sottili fogli di schiuma e piastre di raffreddamento in sequenza alternata. Nel seguente sistema ci sarà eventualmente un telaio che servirà a mantenere fisicamente allineate le celle, le schiume e le piastre di raffreddamento e sotto compressione. Per cui i vantaggi introdotti dalle schiume di PCM sono:

- Garantire una moderata e costante compressione che controlla lo stress meccanico;
- Consentire di rimuovere le disomogeneità termiche presenti nel pacco batterie.

Dunque, la seguente soluzione permette di gestire correttamente una serie di aspetti rilevanti sia dal punto di vista termico che meccanico.

1.2.2 Tipologie di PCM

Dopo aver analizzato l'utilità associata all'impiego dei seguenti materiali, può essere interessante scoprire le famiglie di materiali PCM disponibili. Come riportato in [1], tali materiali sono suddivisi in quattro categorie:

1. Paraffine;
2. Acidi grassi;
3. Materia organica;
4. Materiali composti.

Considerando il caso di studio riportato in [1], è possibile notare come l'utilizzo di tali materiali risulti benefico per l'economia del pacco batteria, poiché mantengono la temperatura di funzionamento del sistema a valori ottimali come rappresentato in Figura 8:

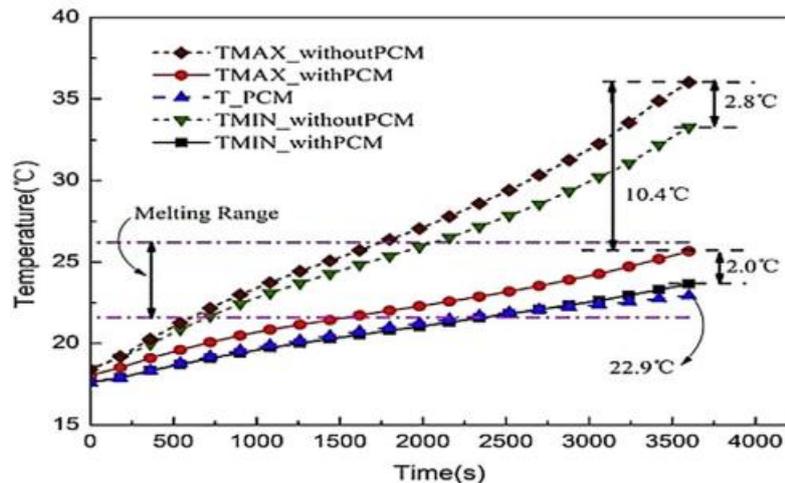


Figura 8: Effetto dei PCM sulla temperatura massima e minima delle batterie

Inoltre, in [1] è proposto uno studio dettagliato che identifica delle soluzioni moderne per migliorare le prestazioni offerte dai PCM. Oggi molti additivi vengono aggiunti alla struttura composta del PCM per migliorare le proprietà di trasferimento del calore, capacità termica e conducibilità termica. Alcuni esempi sono rappresentati da:

- Presenza di fibre di carbonio in una struttura a matrice paraffinica;
- Presenza di nanoparticelle di alluminio nel composito PCM.

Capitolo 2

Stato dell'arte: Termografia

Dopo aver introdotto nel capitolo precedente l'importanza della scelta dei materiali da impiegare, secondo il TMS, nell'ambito del pacco batteria delle auto elettriche; nel capitolo seguente verrà introdotta una panoramica generale circa la metodologia utilizzata sperimentalmente per ottenere informazioni sulle proprietà termiche dei materiali oggetto di studio. Come ampiamente spiegato in [6], la termografia ad infrarossi consente la registrazione di onde elettromagnetiche emesse da oggetti utilizzando un sistema di imaging ad infrarossi, come una telecamera ad infrarossi. La termografia può essere divisa in due approcci:

- *Attiva*: applicata in presenza uno stimolo esterno atto ad indurre un contrasto termico;
- *Passiva*: applicata a materiali e strutture che sono naturalmente ad una temperatura diversa da quella ambiente.

2.1 Termografia attiva

Nel seguente lavoro di tesi verrà utilizzata esclusivamente la termografia attiva. In particolar modo, si utilizzerà come fonte di alimentazione esterna un laser, il quale inciderà direttamente sulla superficie del campione di materiale analizzato. La termografia attiva, come sottolineato in [6] presenta numerose tecniche come mostrato in Figura 9; considerando quelle che si basano su una fonte di eccitazione esterna esistono tre tecniche termografiche attive: termografia lock-in (LT) e termografia pulsata (PT), che sono tecniche ottiche applicate esternamente; e vibrografia (VT), che utilizza onde sonore o ultrasoniche (pulsate o modulata in ampiezza) per eccitare caratteristiche superficiali o interne. Gli aspetti sperimentali e teorici sono diversi per ciascuna di queste tecniche e così sono le applicazioni tipiche. Può essere interessante confrontare tra di loro le prime due tecniche per analizzare le differenze sostanziali non solo in termini di modalità di eccitazione esterna, ma anche di monitoraggio: in stato stazionario oppure in stato transitorio.

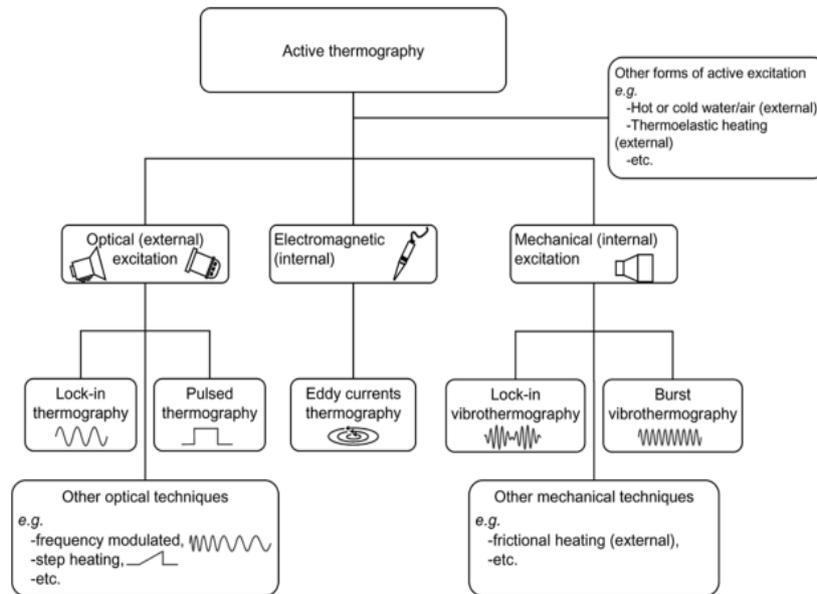


Figura 9: Metodi di termografia attiva

2.1.1 Termografia Pulsata

La termografia Pulsata (PT) rappresenta la tecnica che sarà utilizzata nel seguente lavoro di tesi. Come descritto in [7], nella termografia pulsata (PT), il campione ispezionato viene stimolato da un impulso di calore attraverso una specifica fonte di alimentazione, nella fattispecie un laser, e il monitoraggio avviene nello stato transitorio. La durata dell'impulso può variare da pochi millisecondi a diversi secondi a seconda le proprietà termofisiche del sistema analizzato. In Figura 10 è riportato un esempio:

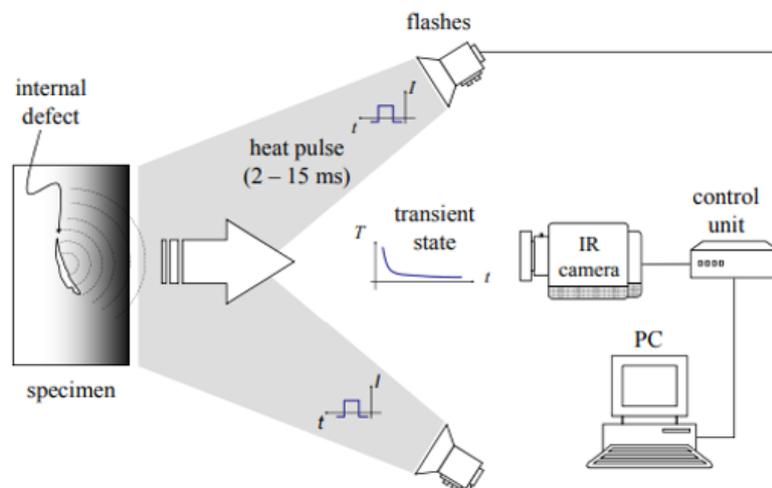


Figura 10: Esempio di termografia pulsata con sistema in riflessione

Analizzando lo schema proposto in Figura 10, è possibile notare il modo in cui sono disposti la termocamera ed il laser. Si definiscono due configurazioni:

- *Riflessione*: in cui termocamera e laser si trovano dallo stesso lato, in particolare in [9] è riportato un interessante studio sperimentale, nel quale si affronta il problema di analizzare in piano la variazione di temperatura sulla superficie di uno specifico campione;
- *Trasmissione*: in cui termocamera e laser si trovano agli estremi con il campione di materiale analizzato interposto tra i due.

Nello studio sperimentale conseguito, si è deciso di utilizzare esclusivamente la configurazione in trasmissione.

2.1.2 Termografia Lock-in

Come descritto in [8], la termografia lock-in (LT), prevede che un'onda di calore modulata in ampiezza venga applicata al campione con un monitoraggio nello stato stazionario. L'onda periodica si propaga per irraggiamento nell'aria fino a raggiungere la superficie del campione dove il calore viene prodotto e si propaga attraverso il materiale. In Figura 11 è riportato un esempio di schema in modo da poter comprendere meglio il funzionamento della tecnica seguente:

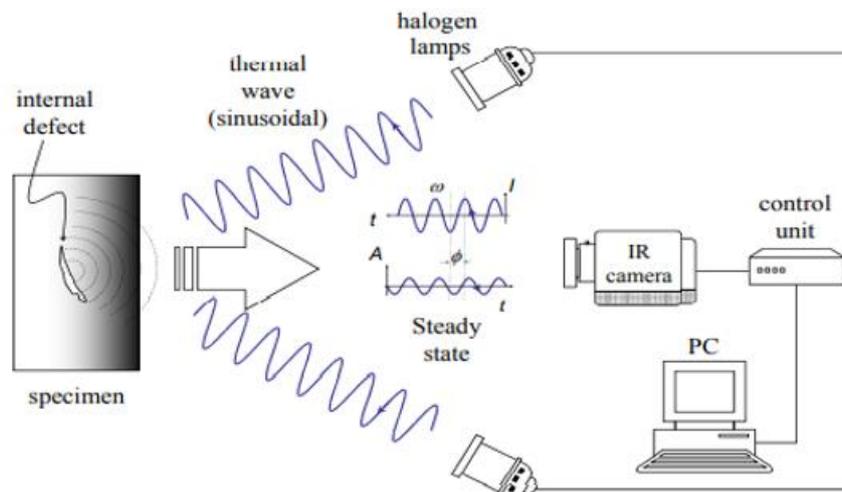


Figura 11: Esempio di termografia Lock-in con sistema in riflessione

2.2 Il corpo nero

Dopo aver introdotto brevemente il meccanismo alla base del funzionamento della termografia attiva, può essere interessante definire alcuni concetti teorici necessari per inquadrare dal punto di vista fisico il problema oggetto di studio. Come viene descritto in [10], ogni oggetto alla temperatura T sopra lo zero assoluto irradia radiazione elettromagnetica. Dal punto di vista della lunghezza d'onda, questa radiazione si registra nel campo dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico. Il corpo nero può essere definito come una superficie ideale che non riflette, non trasmette ma assorbe tutta la radiazione incidenti; ciò può essere osservato in modo chiaro in Figura 2.4:

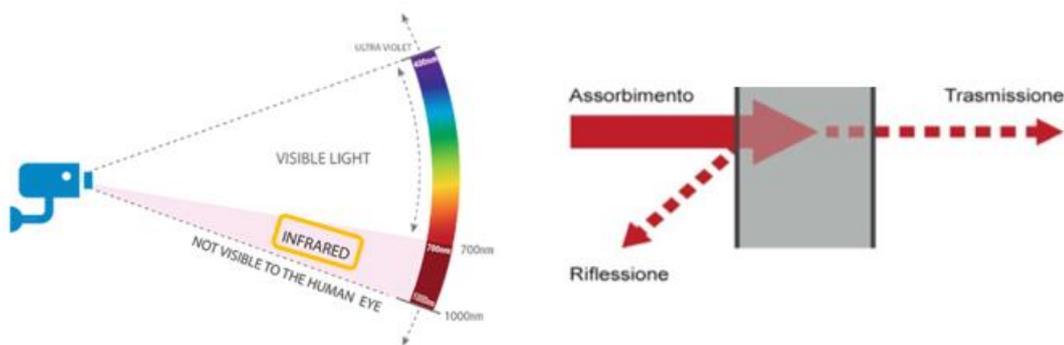


Figura 12: Spettro elettromagnetico e divisione dei flussi di calore

Un'altra particolare proprietà del corpo nero è rappresentata dal fatto che esso è un perfetto corpo radiante, da cui:

$$\alpha = \varepsilon = 1 \quad (2.1)$$

Dove:

- α è l'assorbimento totale;
- ε è l'emissività.

Legge di Stefan Boltzmann permette di valutare l'intensità totale della radiazione :

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1)} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

Dove:

- λ lunghezza d'onda [m];
- h costante di Plank [$h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js];
- c velocità della luce [$c = 3 \cdot 10^8$ m/s];

- T temperatura assoluta [K];
- $\bar{\sigma}$ costante di Stefan-Boltzmann $\left[\bar{\sigma} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right]$.

2.3 Il corpo grigio

Il corpo nero rappresenta un'approssimazione teorica e ideale, per cui è necessario identificare un modello realistico che possa avere applicabilità nell'ambito sperimentale e non solo. Dato che la capacità di un oggetto reale di emettere la radiazione elettromagnetica assorbita è limitata dalla sua superficie dato che l'emissività, $\epsilon < 1$, si introduce, come spiegato in [10] e [11], il corpo grigio. Esso non è altro che un oggetto la cui emissività è indipendente dalla gamma di lunghezze d'onda in cui la termocamera opera, come è possibile notare in Figura 13:

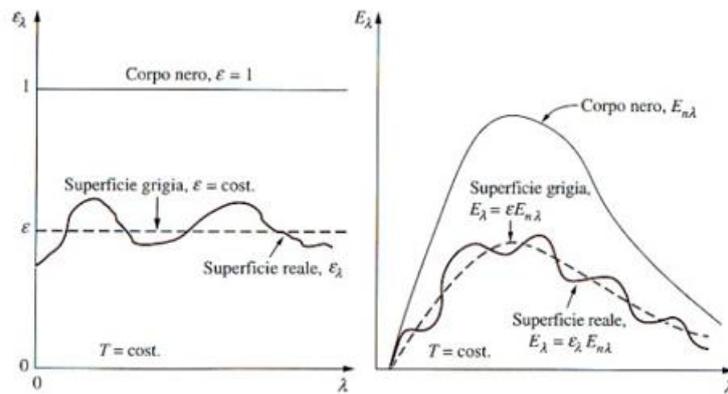


Figura 13: Confronto tra corpo nero e corpo grigio

In fase di sperimentazione oltre all'emissività, bisogna tener conto degli effetti dovuti all'ambiente esterno. In particolare, essendo E_{tot} l'energia totale rilevata dalla termocamera pari a:

$$E_{tot} = E_{ogg} + E_{rif} + E_{atm} \quad (2.3)$$

Dove:

- E_{ogg} è l'energia emessa dall'oggetto;
- E_{rif} è l'energia riflessa dall'ambiente circostante emessa dall'oggetto;
- E_{atm} è l'energia emessa dall'atmosfera.

Da cui:

$$T_{ogg} = \sqrt[4]{\frac{E_{tot} - (1 - \varepsilon_{ogg}) \cdot \bar{\tau}_{atm} \cdot \bar{\sigma} \cdot T_{rif}^4 - (1 - \bar{\tau}_{atm}) \cdot \bar{\sigma} \cdot T_{rif}^4}{\varepsilon_{ogg} \cdot \bar{\tau}_{atm} \cdot \bar{\sigma}}} \quad (2.4)$$

Con:

- ε_{ogg} emissività oggetto;
- $\bar{\tau}_{atm}$ trasmittanza totale atmosfera;

La corretta definizione è di ε_{ogg} e di T_{rif} grande interesse e importanza nella taratura e regolazione dell'ispezione termografica.

2.4 Equazione del calore

Il fenomeno fisico alla base dell'indagine svolta attraverso la termografia sui campioni di materiale analizzati è riconducibile all'equazione del calore. Il modello classico di conduzione del calore noto come equazione di Fourier è governato dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.5)$$

Dove:

- $\alpha = \frac{K}{\rho C}$ è la diffusività termica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$;
- K è la conducibilità termica $\left[\frac{W}{mK}\right]$;
- C è il calore specifico $\left[\frac{J}{kgK}\right]$;
- ρ è la densità $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Due importanti assunzioni:

1. Le condizioni adiabatiche permettono di trascurare le perdite di calore;
2. Il materiale risulta isotropo e opaco.

A partire dalla seguente equazione è possibile identificare la soluzione unidimensionale per una funzione delta di Dirac in un solido isotropo semi-infinito. Per completezza si riportano entrambe le soluzioni identificare per le tecniche di Termografia Pulsata (PT) e Lock-in (LT). L'equazione (2.6) sarà successivamente richiamata nel capitolo dedicato alla costruzione del modello predittivo atto alla ricostruzione degli andamenti sperimentali ottenuti in laboratorio.

Per la Termografia Pulsata (PT):

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p \pi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.6)$$

Per la Termografia Lock-in (LT):

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - \omega t\right) \quad (2.7)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (2.8)$$

Capitolo 3

Strumentazione di laboratorio

Dopo aver introdotto i concetti teorici necessari per comprendere il fenomeno fisico alla base della tecnica termografica, nel capitolo seguente si passa in rassegna l'insieme degli strumenti di laboratorio, sia hardware che software, utilizzati per raccogliere i dati di interesse. Il sistema utilizzato è il "Multides system laser" il cui funzionamento è ampiamente descritto in [12]. Prima di analizzare ciascun componente che costituisce il sistema, in Figura 14 è riportato uno schema funzionale:

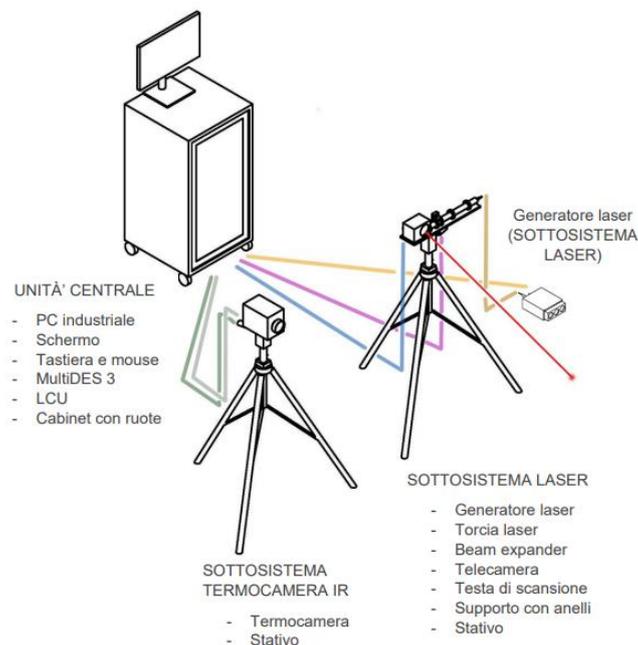


Figura 14: Schema funzionale del sistema

In Figura 15 invece è riportato il banco prova utilizzato in laboratorio, comprensivo di termocamera, porta campione e laser e non dell'unità centrale, la quale è posizionata lateralmente:



Figura 15: Banco prova presente in laboratorio

3.1 Termocamera

Il seguente strumento consente di rilevare il contrasto termico presente sulla superficie di un opportuno campione sottoposto all'impulso laser. Il modello di termocamera utilizzato è il "Flir X6540sc", come riportato in Figura 16, il cui manuale è riportato in [13]:



Figura 16: Termocamera Flir X6540sc

Il software utilizzato per interfacciarsi con la termocamera è "ResearchIR" il cui funzionamento è descritto in [14] e in [15]. Una volta che la termocamera risulta connessa è possibile impostare una serie di parametri al fine di poter ottenere degli andamenti

sperimentali adeguati. Prima di tutto è necessario impostare la durata della registrazione e la directory in cui salvare le prove sperimentali. In Figura 17 si riporta la schermata presente sul software ResearchIR che permette di definire i suddetti parametri:

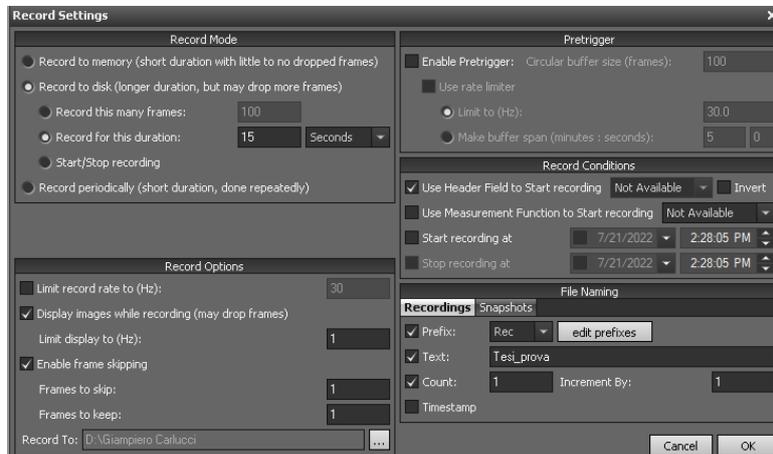


Figura 17: Impostazione preliminare dei parametri della Termocamera

Completata tale operazione si procede con la definizione di una variabile estremamente importante in termini di qualità dell'acquisizione dei dati di una prova sperimentale, il *frame rate*, come rappresentato in Figura 18:

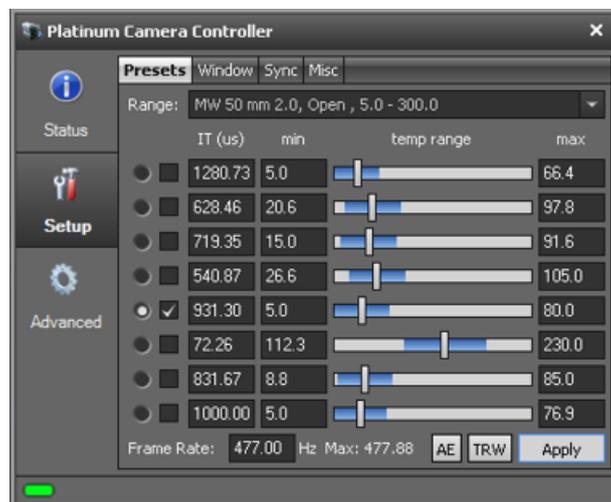


Figura 18: Definizione del frame rate

Infine, è opportuno posizionare l'inquadratura della termocamera correttamente in modo da osservare esclusivamente la superficie del campione. Questa operazione viene raffigurata in Figura 19:



Figura 19: Posizionamento corretto dell'inquadratura

Attraverso i passaggi precedentemente descritti è possibile configurare completamente la termocamera per poter raccogliere informazioni ottimali circa gli andamenti sperimentali.

3.2 Laser

Il laser rappresenta la sorgente da cui generare l'impulso sulla superficie di un campione analizzato e viene riportato in Figura 20:



Figura 20: Laser presente in laboratorio

Il software utilizzato per dialogare con la sorgente di calore, nella fattispecie il laser stesso, è “Multides” ampiamente descritto in [12] e [15]. Come già visto per la termocamera, si procede con la definizione dei parametri che definiscono il tipo di impulso sulla superficie del campione. Completata la procedura manuale di avvio dal sistema di Interlock, si inserisce il numero della postazione di lavoro nel campo MDCSBox ID nella pagina System Settings, come si può notare dalla figura 21:

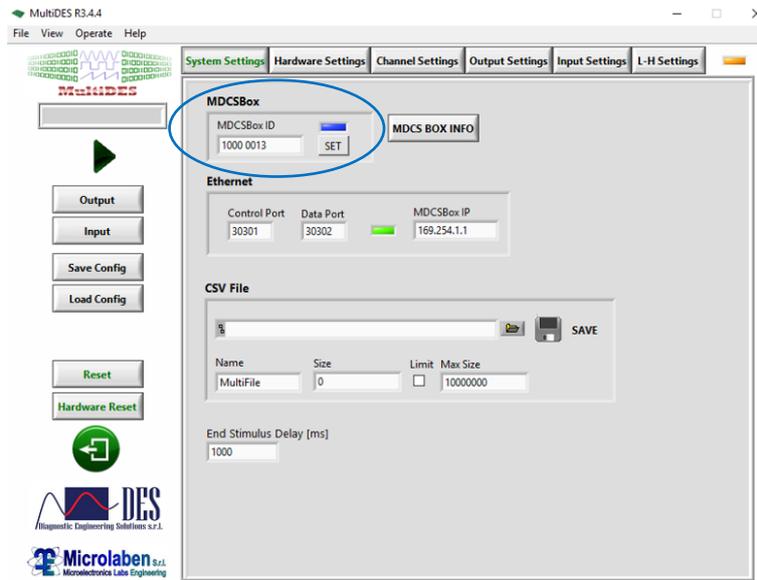


Figura 21: Schermata iniziale Multides

Dopodiché, in corrispondenza della pagina Input Settings si imposta il modulo Control:

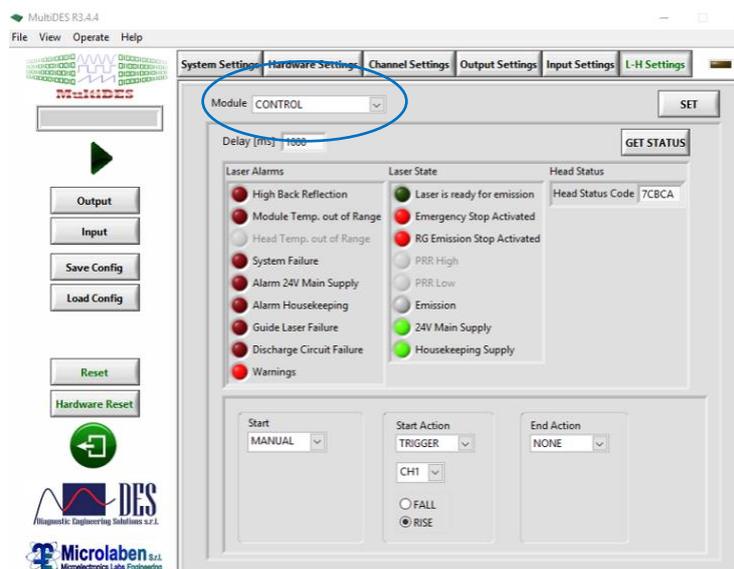


Figura 22: Schermata Control Multides

Come è possibile notare dalla Figura 22 è necessario che le spie siano opportunamente accese come descritto in [15] affinché sia possibile svolgere le prove sperimentali in sicurezza. Infine, si imposta dalla pagina laser l'insieme dei parametri di interesse:

- Tipo di impulso;
- Durata dell'impulso;
- Potenza del laser.

Una volta conclusa la configurazione del laser è possibile eseguire una prova premendo il tasto Play posizionato a sinistra, come visibile in Figura 23:

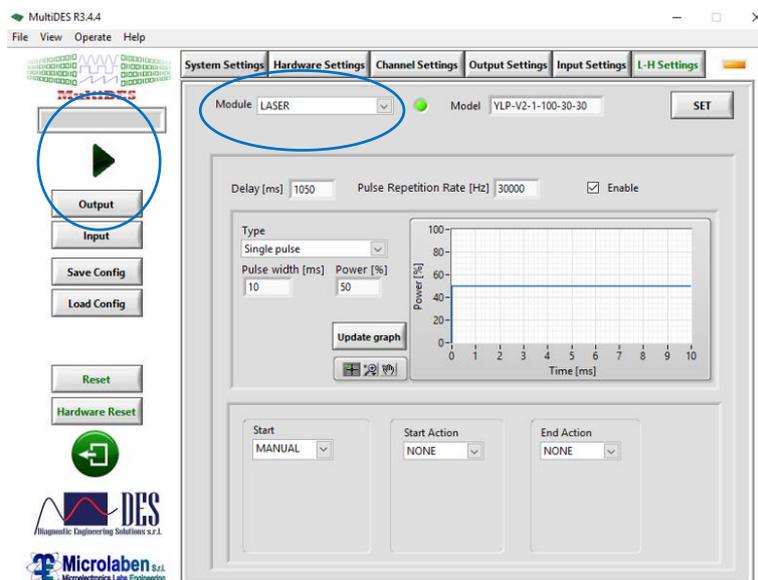


Figura 23: Schermata Laser Multides

In alternativa è possibile utilizzare un programma simile chiamato “Irta2” spiegato in [16], anche se nel seguente lavoro di tesi si sfrutterà esclusivamente Multides.

3.3 Porta campione

Dopo aver descritto i passaggi da seguire per poter configurare sia la termocamera che il laser, in questa sezione si affronta il problema relativo al posizionamento del campione di materiale analizzato. Per poter ottenere risultati corretti sarebbe opportuno ridurre il contatto tra il provino e il porta campione stesso. Allo stesso tempo è necessario che la superficie del provino risulti perpendicolare alla radiazione emessa dal laser ed evidentemente alla direzione di osservazione della termocamera. Per tali motivazioni vengono illustrate due soluzioni possibili che verranno confrontate.

3.3.1 Soluzione iniziale

La soluzione seguente prevede che il provino sia mantenuto in posizione da una “mollettina”, la quale però con la sua azione di presa occupa la zona superiore del provino stesso aumentando la superficie di contatto esistente. In Figura 24 è riportata una rappresentazione di questa prima soluzione con la relativa visualizzazione attraverso la termocamera:

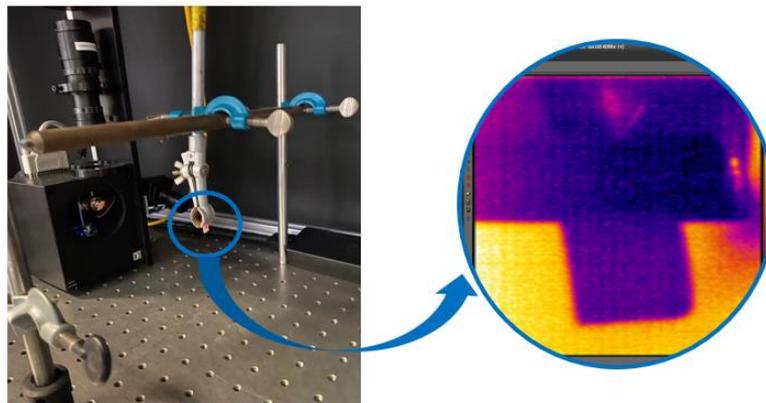


Figura 24: Soluzione iniziale per il porta campione

3.3.2 Soluzione finale

Per ovviare al problema relativo alla riduzione del contatto tra provino e porta campione rilevato in precedenza, può essere interessante identificare una soluzione alternativa come quella mostrata in Figura 25:

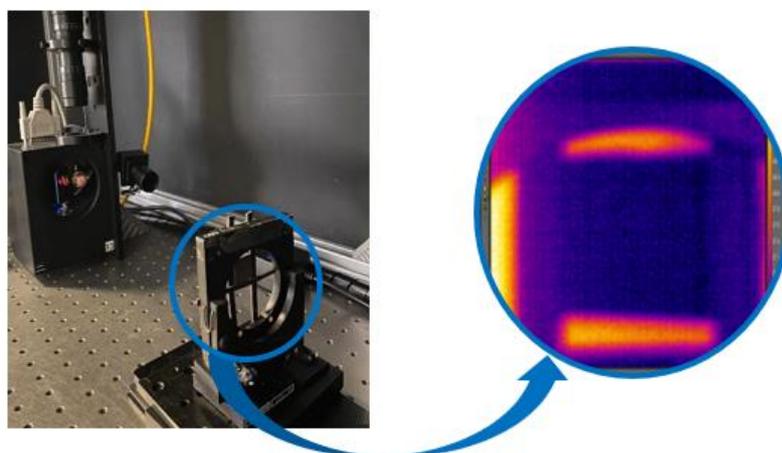


Figura 25: Soluzione finale per il porta campione

Osservando la Figura 25 è possibile notare come il campione presenti esclusivamente un contatto laterale con dei fili in materiale siliconico che compongono una matrice atta a resistere anche alle elevate temperature. In questo modo il contatto viene evidentemente ridotto a favore di un corretto svolgimento delle prove sperimentali. La soluzione seguente sarà adottata per tutte le prove a temperatura ambiente e in temperatura per ciascun famiglia di materiali.

3.4 Forno a Muffola

Conclusa l'analisi del banco prova per lo svolgimento di prove in termografia attiva, si introduce un altro elemento estremamente importante nell'economia del seguente lavoro di tesi, il forno a Muffola. Esso non è altro che un forno elettrico utilizzato prevalentemente in ambito metallurgico oppure chimico ed è in grado di raggiungere temperature estremamente elevate come 1800°C, grazie al materiale refrattario presente al suo interno. Il forno a Muffola chiamato anche Muffola verrà utilizzato per preriscaldare i campioni delle varie famiglie di materiali disponibili, prima di sottoporli a prove termografiche. In Figura 26 è raffigurato il forno presente in laboratorio:



Figura 26: Forno a Muffola presente in laboratorio

3.5 Analisi dei dati sperimentali

Completata la valutazione relativa alla strumentazione utilizzata in laboratorio, per comodità è riportato in Figura 27 uno schema sintetico dei passaggi da eseguire per indagare i dati raccolti sperimentalmente:

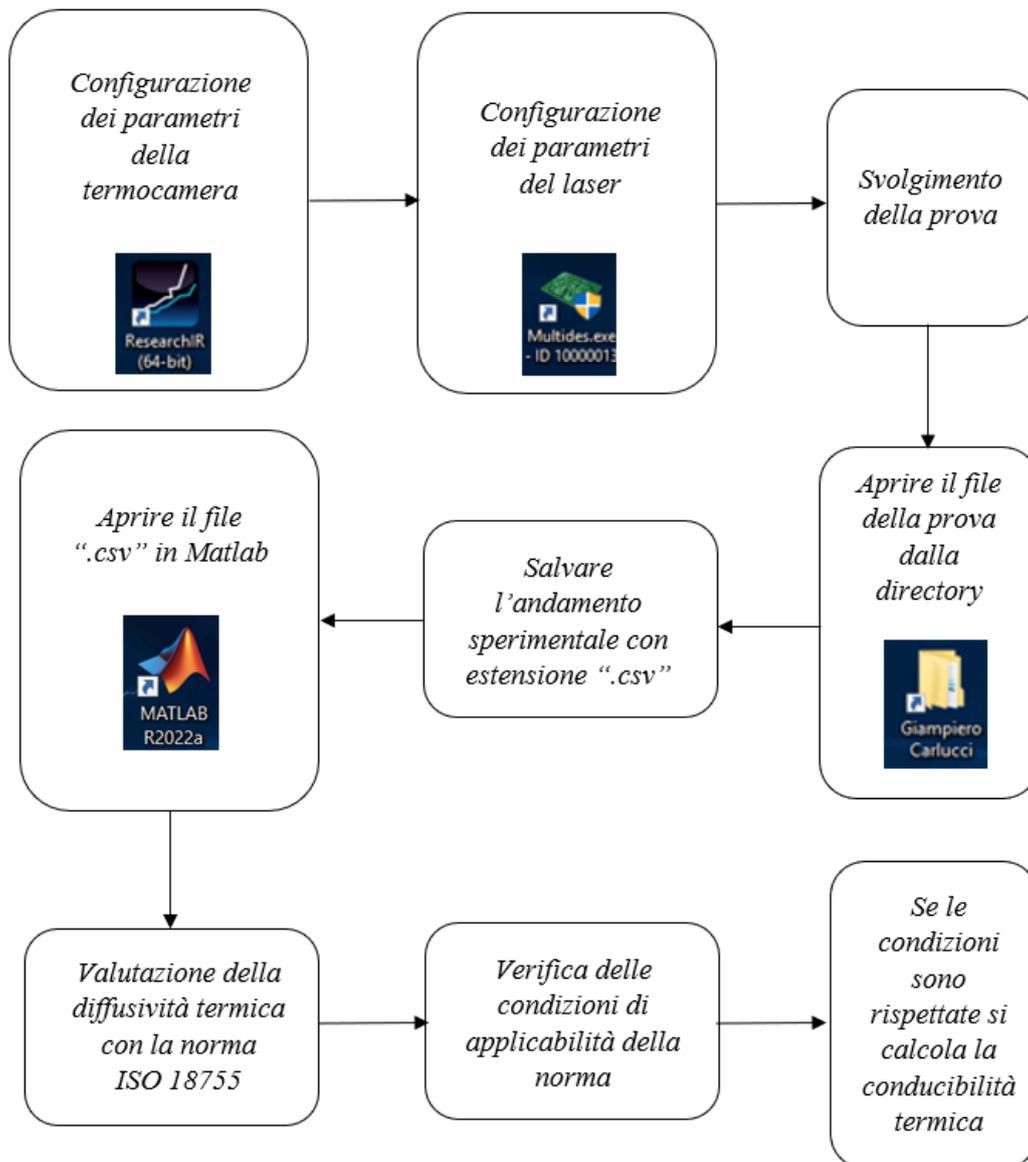
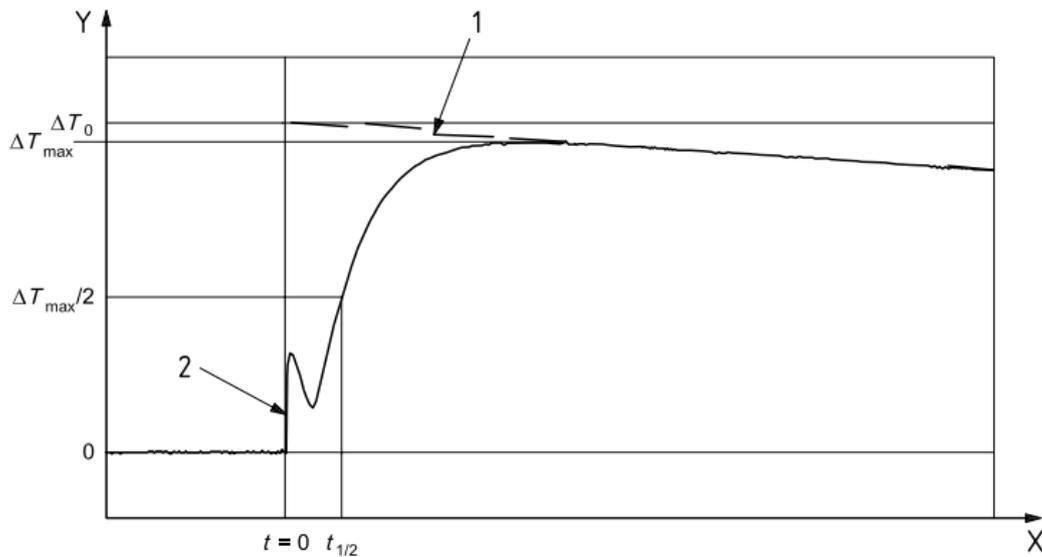


Figura 27: Schema logico relativo all'analisi dei dati sperimentali

Come si evince dal seguente schema riassuntivo, per poter ricavare i parametri di interesse che permettono di ottenere un rapporto completo circa le proprietà termiche dei materiali indagati, risulta necessario utilizzare una normativa di riferimento: nella fattispecie la *ISO 18755* riportata in [17]. In particolar modo, tale normativa vale per i materiali ceramici ai quali si applica l'indagine termografica. Dato che nel seguente lavoro di tesi saranno analizzati diversi tipi materiali, la *ISO 18755* sarà sostanzialmente adattata ai campioni oggetto di studio. Il metodo alla base del calcolo della diffusività termica, secondo normativa, è rappresentato dal "Metodo del tempo di metà riscaldamento". Per poter comprendere meglio il significato e il modo in cui applicare il suddetto metodo, si analizza la Figura 28 presente :



Key
 X: time
 Y: temperature rise

Figura 28: Evoluzione della temperatura in funzione del tempo

La seguente immagine mostra l'andamento di temperatura in corrispondenza della faccia posteriore del campione a fronte di un impulso luminoso sulla faccia anteriore del campione stesso. Di seguito si analizza il significato dei vari parametri:

- t_0 è il tempo di inizio dell'impulso laser;
- ΔT_{max} è la differenza tra il massimo valore di temperatura raggiunto dalla faccia posteriore del provino e la sua temperatura prima dell'impulso laser.
- $t_{1/2}$ è il tempo di metà riscaldamento, ovvero il tempo dall'origine necessario affinché la superficie del campione incrementi la sua temperatura di metà $\Delta T_{max}/2$.

Sono inoltre presenti due ulteriori indicazioni in Figura 28:

1. Definisce l'andamento esponenziale che approssima la fase di raffreddamento a valle del picco di ΔT partendo da ΔT_0 ;
2. Indica un disturbo iniziale .

Il parametro di interesse è rappresentato dall'istante di tempo $t_{1/2}$ poiché a partire da tale valore è possibile stimare il contenuto di diffusività termica di un provino. In particolar modo si definisce:

$$\alpha = 0,1388 \cdot \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (3.1)$$

Dove d [m] è lo spessore del campione analizzato. Come già accennato nello schema di Figura 17, la normativa impone diverse condizioni al contorno da rispettare. Di seguito si riportano le limitazioni più stringenti:

- Il campione deve essere un piatto piano di forma circolare, quadrata o rettangolare. Il diametro o il lato del campione deve essere compreso tra 5 mm e 15 mm. Lo spessore del provino deve essere scelto o di spessore superiore a 0,5 mm e inferiore a 5 mm, oppure sufficientemente spesso che il $t_{1/2}$ è maggiore di 5 volte l'ampiezza dell'impulso;
- La faccia anteriore del campione è riscaldata uniformemente dall'impulso luminoso;
- Il campione è adiabatico durante il periodo di misurazione dopo il riscaldamento dell'impulso luminoso;
- Il campione è uniforme (in geometria) ed è omogeneo.
- Il campione è opaco (non trasparente e non traslucido) all'impulso luminoso e alla radiazione termica.
- Lo spessore del provino deve essere selezionato in modo tale che l'ampiezza dell'impulso sia inferiore a 0,01 del tempo di metà riscaldamento (*C.D.I. condizione della durata dell'impulso*);
- Il sistema di acquisizione dati deve essere in grado di campionare più di 1000 punti dati sul termogramma con una frequenza di campionamento superiore a $100/t_{1/2}$ (*C.F.R. condizione sul frame rate*).

Le ultime due condizioni sono di estrema importanza per poter applicare la normativa ed evidentemente valutare le proprietà termiche dei materiali oggetto di studio. Il metodo del tempo di metà riscaldamento trascura le dispersioni di calore. L'indagine sperimentale sperimentalmente sulle quattro famiglie di materiali non può essere considerata adiabatica a causa della loro bassa diffusività termica. Per questo motivo i risultati che si otterranno a valle dei dati raccolti sperimentalmente potranno essere affetti da errori sistematici che determineranno una più o meno leggera deviazione dalle indicazioni riportate in letteratura per ciascuna famiglia.

Capitolo 4

Alcen paper Denka

Nel seguente capitolo si analizza la prima famiglia di materiali disponibile, ossia gli Alcen paper Denka. Lo studio si compone inizialmente di un'indagine preliminare atta a valutare tra i vari campioni disponibili, quelli idonei ad essere analizzati. Dopodiché si procede con una valutazione delle proprietà termiche a temperatura ambiente, tra cui la conducibilità termica che verrà confrontata con i valori presenti in letteratura. In fine, l'indagine si conclude con lo studio in temperatura in modo da ricavare l'andamento delle conducibilità termica al variare della temperatura stessa.

4.1 Indagine preliminare

Per poter caratterizzare termicamente tali materiali è conveniente eseguire un'analisi preliminare per comprendere le proprietà fisiche e un'analisi di trasmittanza, quest'ultima necessaria a definire quali tra i diversi campioni saranno studiati. I provini disponibili per la seguente famiglia di materiali sono tre:

Provino [-]	Spessore [mm]
t1	1
t2	2
t3	3

Tabella 1: Campioni Alcen Denka disponibili

Analizzando la Tabella 1 è possibile osservare lo spessore di ciascun campione a disposizione. Per capire quali tra i vari campioni sarà opportuno analizzare, si procederà con un'analisi della trasmittanza a valle dell'indagine microscopica.

4.1.1 Analisi al microscopio

L'indagine si basa su un campione quadrato t3 sottoposto a diverse indagini. Per prima cosa in Figura 29 è riportata un'immagine del campione con relativo ingrandimento ottenuta con il microscopio elettronico a scansione (SEM):

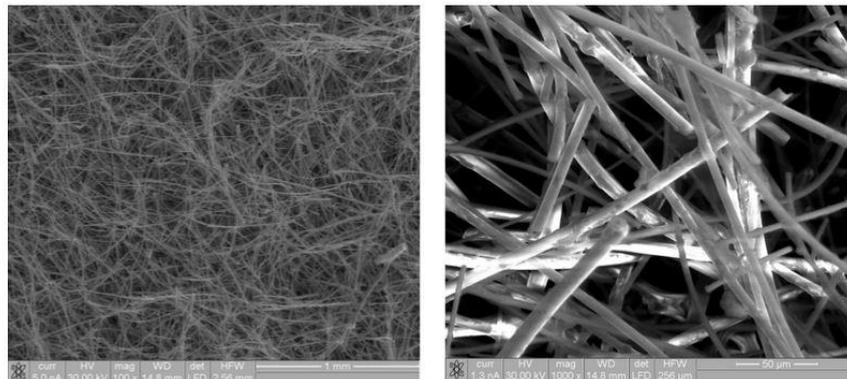


Figura 29: Immagini SEM campione t3

Il campione si presenta come un reticolo irregolare di fibre a base ceramica. Il diametro delle fibre è variabile e compreso mediamente fra 3.8 e 12 μm circa, con alcune rare fibre più spesse che arrivano fino a 30 μm . Si notano anche delle particelle/depositi sulle fibre, composte prevalentemente da materiale a base carbonio. Si riporta in Figura 30 lo spettro EDS rappresentativo della composizione del campione con tensione di accelerazione 30 kV:

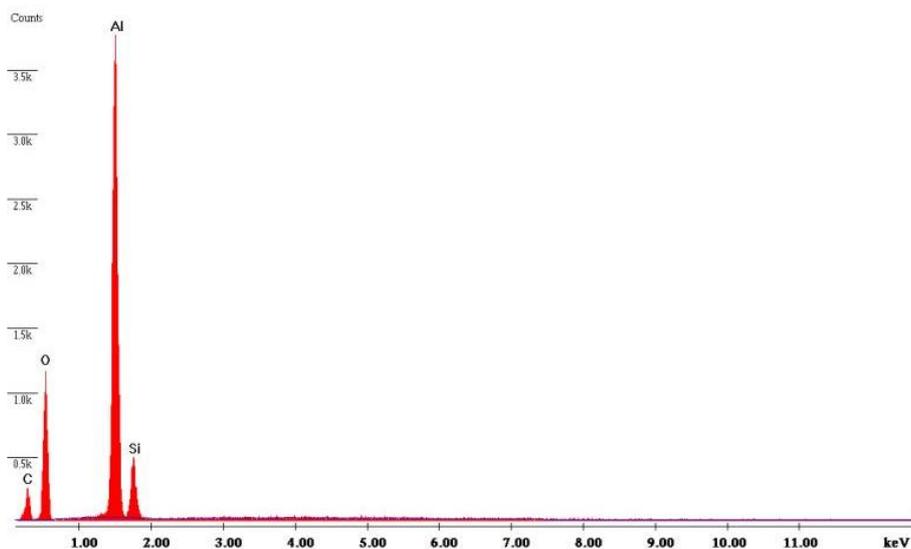


Figura 30: Spettro EDS rappresentativo del campione

La figura precedente identifica la composizione elementare del campione analizzato mostrando il numero di raggi X raccolti ad ogni energia. Lo studio che afferisce alle proprietà chimiche del campione analizzato si conclude con un'analisi della microfluorescenza a raggi X, un metodo semplice e altamente sensibile utilizzato per determinare la composizione chimica del provino t3. In particolare, nelle due figure successive si riportano e informazioni di interesse:

Spot size: 25µm, Atmosfera :20mbar (vuoto) sorgente tubo raggi X (rodio): 50kV-200µA

ALCEN DENKA

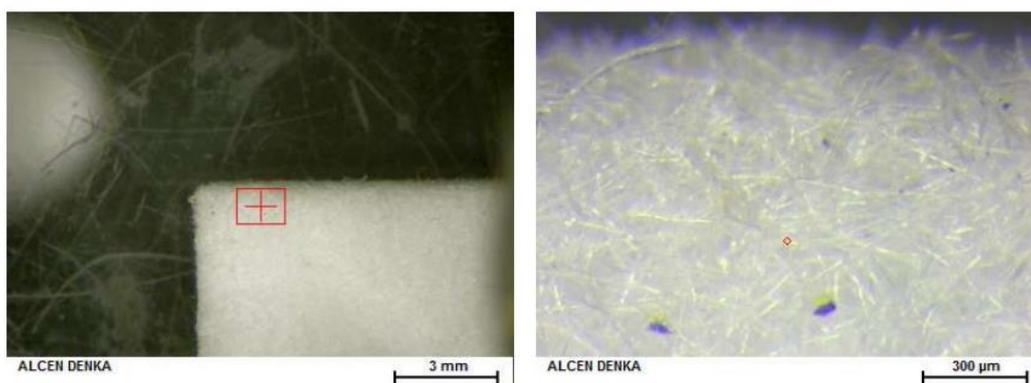


Figura 31: Condizioni di partenza per l'indagine

Analisi semi-quantitativa risultati espressi in percentuale [%]

ALCEN DENKA 2	0.29	Al ₂ O ₃ 82.38	SiO ₂ 17.51	Fe ₂ O ₃ 0.11	Rh	O
ALCEN DENKA 1	0.34	Al ₂ O ₃ 81.17	SiO ₂ 18.73	Fe ₂ O ₃ 0.10	Rh	O
ALCEN DENKA	0.34	Al ₂ O ₃ 80.79	SiO ₂ 19.12	Fe ₂ O ₃ 0.09	O 0.00	Rh

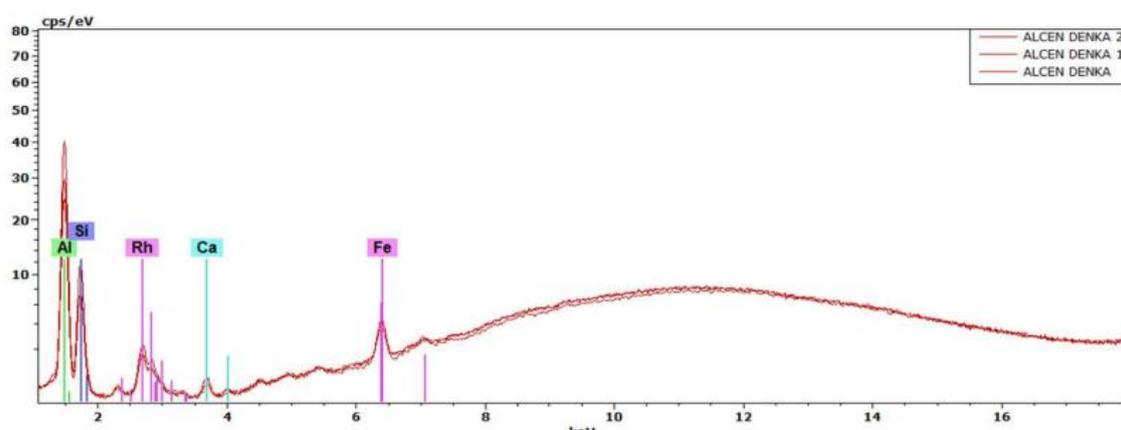


Figura 32: Analisi semi-quantitativa con risultati espressi in percentuale [%]

Il campione di tappetino fibroso t3 è stato analizzato in più punti mediante microfluorescenza a raggi X. La base è risultata essere costituita da Alluminio con Silicio e tracce di Ferro, mentre il Rapporto Allumina/Silice ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) stimato è risultato essere pari ad 80/20.

4.1.2 Analisi della trasmittanza

L'indagine preliminare si conclude con la valutazione della trasmittanza, ossia la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare da una parte della luce incidente, dei tre campioni disponibili. Per ottenere la seguente informazione si richiede l'ausilio di uno spettrofotometro. I risultati sono riportati in Figura 33:

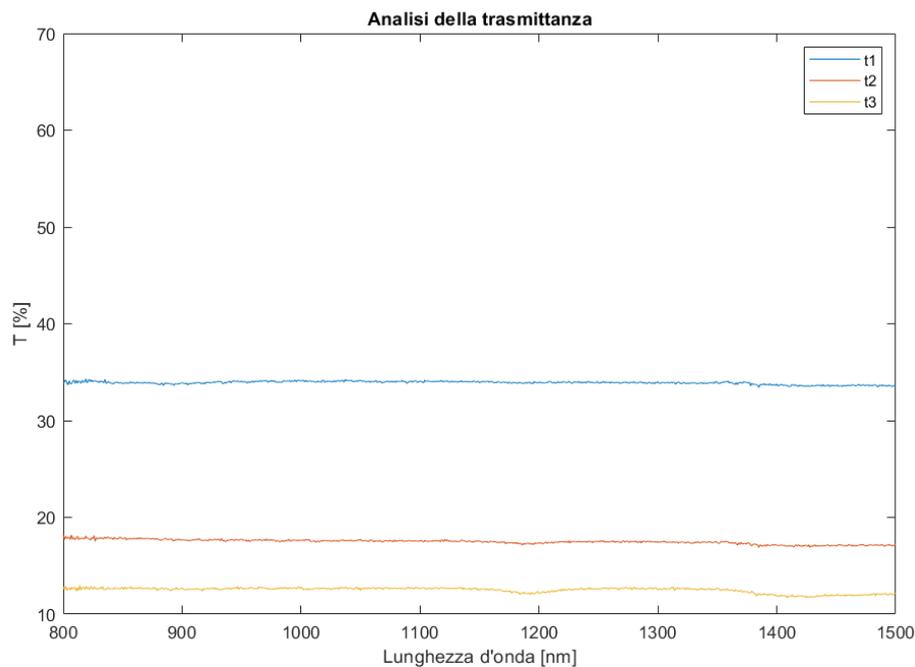


Figura 33: Valutazione della trasmittanza dei tre campioni

Le prove a temperatura ambiente e in temperatura saranno svolte unicamente per i campioni t2 e t3, dato che il campione t1 presenta il valore di trasmittanza più alto, a causa dello spessore limitato. Un valore di trasmittanza elevato risulta problematico in termini di applicazione della tecnica termografica. Se il materiale non è in grado di trattenere per un intervallo di tempo sufficiente una specifica quantità di calore, significa che il transitorio di riscaldamento risulta così rapido che l'applicazione della normativa, potrebbe non essere garantita. Questo poiché non si riuscirebbe a soddisfare la condizione sulla durata dell'impulso (C.D.I.), già accennata nel capitolo precedente.

4.2 Studio a temperatura ambiente

Terminata l'indagine preliminare per la famiglia degli Alcen paper Denka, si procede con l'analisi delle proprietà termiche a temperatura ambiente per i due campioni t2 e t3. Prima di passare in rassegna i risultati sperimentali ottenuti si ricorda che la superficie dei campioni oggetto di studio non è opaca, come visibile in Figura 34:



Figura 34: Fogli di Alcen paper Denka

Proprio per questo motivo risulta conveniente annerire la superficie dei provini prima di sottoporli all'indagine termografica. Tale operazione ha lo scopo di ottimizzare l'assorbimento degli impulsi energetici e l'emissione di radiazioni termiche, in modo che gli andamenti sperimentali non necessitino di alcun tipo di filtraggio. In Figura 35 è riportata la bomboletta utilizzata per opacizzare la superficie dei provini:



Figura 35: Bomboletta spray per annerire i campioni

4.2.1 Campione t3

Dopo aver sottolineato l'importanza relativa all'annerimento dei campioni, si procede con lo studio sperimentale partendo dal campione t3 riportato in Figura36:



Figura 36: Campione t3 annerito 14,65x14,04x3 mm

Prima di eseguire i vari test è necessario configurare in modo opportuno la termocamera, i cui parametri sono riportati, con i rispettivi valori, in Tabella 2:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 2: Parametri della termocamera Alcen Denka

Una volta configurati adeguatamente tutti i parametri della termocamera attraverso ReserachIR, si procede con la configurazione dei parametri del laser attraverso Multides che verranno via via modificati per mettere in luce gli effetti sia della potenza del laser che della durata dell'impulso. In Tabella 3 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione t3:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	50	0,87	4,5	3,63	20	36,3	27,54	OK	OK
2	55	0,91	4,57	3,66	20	36,6	27,32	OK	OK
3	60	0,88	4,52	3,64	20	36,4	27,47	OK	OK
4	50	0,72	4,23	3,51	10	35,1	28,49	OK	OK
5	55	0,92	4,44	3,52	10	35,2	28,40	OK	OK
6	60	0,87	4,52	3,65	10	36,5	27,39	OK	OK

Tabella 3: Dati campione t3

Le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 37:

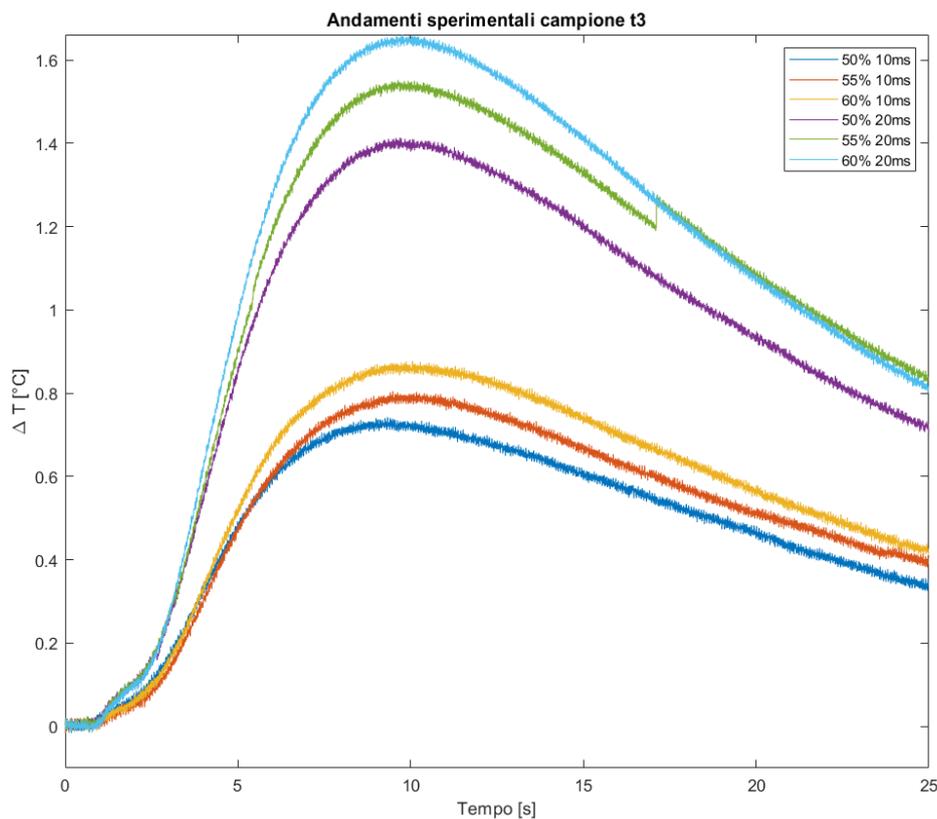


Figura 37: Andamenti di temperatura relativa per il campione t3

Il parametro $T_{ass1/2}$ riportato in Tabella 3 rappresenta il tempo di metà riscaldamento assoluto ottenuto a partire dall'origine. Esso viene utilizzato per valutare $t_{1/2}$ effettivo, semplicemente sottraendo il valore di t_0 .

Osservando da un lato gli andamenti sperimentali e dall'altro i risultati tabellati, emerge il fatto che entrambe le condizioni, sia sulla durata dell'impulso sia sulla frame rate, sono rispettate. Dunque, è possibile calcolare sia la diffusività termica che la conducibilità, ricordando che:

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \quad (4.1)$$

Dove:

- α è la diffusività termica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ calcolata con (3.1) ;
- λ è la conducibilità termica $\left[\frac{W}{mK}\right]$;
- c_p è il calore specifico $\left[\frac{J}{kgK}\right]$
- ρ è la densità $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Il valore di calore specifico è estratto direttamente dal sito dell'azienda produttrice:

Al ₂ O ₃	%	80.3	96.5
SiO ₂		19.5	3.3
Fiber diameter	μm		3~5
Shot amount	%		0.5~1.5
Density			3.2~3.6
Melting point	°C		>2,000
Specific heat	J/kgK		1.13~1.20×10 ³

Figura 38: Calore specifico Alcen paper Denka

Per il seguente lavoro di tesi si è deciso di implementare il valore di 1130 J/kgK.

Per quanto concerne invece il valore di densità, si è utilizzato un calibro digitale per misurare accuratamente il provino nelle tre dimensioni per valutare successivamente il volume ed una bilancia digitale estremamente sensibile che permette una lettura corretta del valore di massa. In Tabella 4 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova [-]	c_p [J/kgK]	Massa [kg]	Volume [m ³]	ρ [kg/ m ³]	α [m ² /s]	λ [W/mK]
1	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,44E-07	0,0718
2	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,41E-07	0,0713
3	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,43E-07	0,0716
4	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,55E-07	0,0743
5	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,54E-07	0,0741
6	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,42E-07	0,0714

Tabella 4: Proprietà termiche campione t3

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il campione t3:

$$\lambda_{t3 \text{ medio}} = 0,0724 \frac{W}{mK}$$

Confrontando il seguente valore con quello presente in letteratura, riportato in Figura 39, si nota che:

Material Characteristic		Our materials			Competing products		
		ALCEN	Amorphous Silica	Endothermic paper	Mica	AES	Aerogel
Thickness	mm	0.2 - 2.0	0.5 (0.1 - 0.5)	1.0 (1 - 4)	0.25	1.0	1.0
Density	kg/m ³	100 - 120	400	800	1700 - 2000	220	220
Thermal Conductivity @ 50°C (HFM method) *ASTM D 5470	W/mK	0.069	0.079	0.050 ~0.100	0.130	0.100	0.090
Compression force @ 50%, 2.0 mm/min	kPa	20 (1.0 mmt)	5800 (0.25 mmt)	300 (1.0 mmt)	3200	42	190
Dielectric Strength (ASTM D 3755)	kV/mm	3.7 (0.5 mmt)	2.0 (0.25 mmt)	3.2 (1.0 mmt)	> 40	4.5	3.2
Flame resistance	-	SE (Self extinguishing)	SE	SE	SE	SE	SE
Water absorption (Weight loss @ 120°C)	-	< 4%	< 4%	No data	< 4%	< 4%	In evaluating
Volume resistivity / $\Omega \cdot cm$ (IEC 61340-2-3)	$\Omega \cdot cm$	> 10 ¹⁴	—	—	> 10 ¹⁴	> 10 ¹⁴	> 10 ¹⁴

Figura 39: Conducibilità termica Alcen Denka

Il valore ottenuto sperimentalmente si avvicina molto al valore presente in letteratura, per cui è possibile sottolineare l'affidabilità del metodo per indagare campioni sottoposti a prove con termografia pulsata (PT).

4.2.2 Campione t2

Concluso lo studio relativo al campione t3, si procede con l'esecuzione delle prove sperimentali associate al campione t2 riportato in Figura 40:



Figura 40: Campione t2 annerito 14,39x13,65x2 mm

La termocamera è configurata con gli stessi parametri riportati in Tabella 2. Dunque, percorrendo gli stessi passi precedentemente spiegati in merito al provino t3, in Tabella 5 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione t2 indagato:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	50	0,22	2,01	1,79	10	17,9	55,86	OK	OK
2	55	0,47	2,16	1,69	10	16,9	59,17	OK	OK
3	60	0,45	2,22	1,77	10	17,7	56,49	OK	OK
4	50	0,46	2,02	1,56	5	15,6	64,10	OK	OK
5	55	0,36	1,98	1,62	5	16,2	61,72	OK	OK
6	60	0,33	2,02	1,69	5	16,9	59,17	OK	OK

Tabella 5: Dati campione t2

Rispetto al set di prove utilizzato per il campione t3, si è deciso di ridurre la durata dell'impulso a parità di variazione di potenza laser. La seguente scelta è dettata dal fatto che a causa di uno spessore ridotto rispetto al provino t3, durate di impulso elevate non garantiscono il rispetto della condizione C.D.I. e quindi non sarebbe possibile ottenere informazioni valide in termini di diffusività termica.

Le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 41:

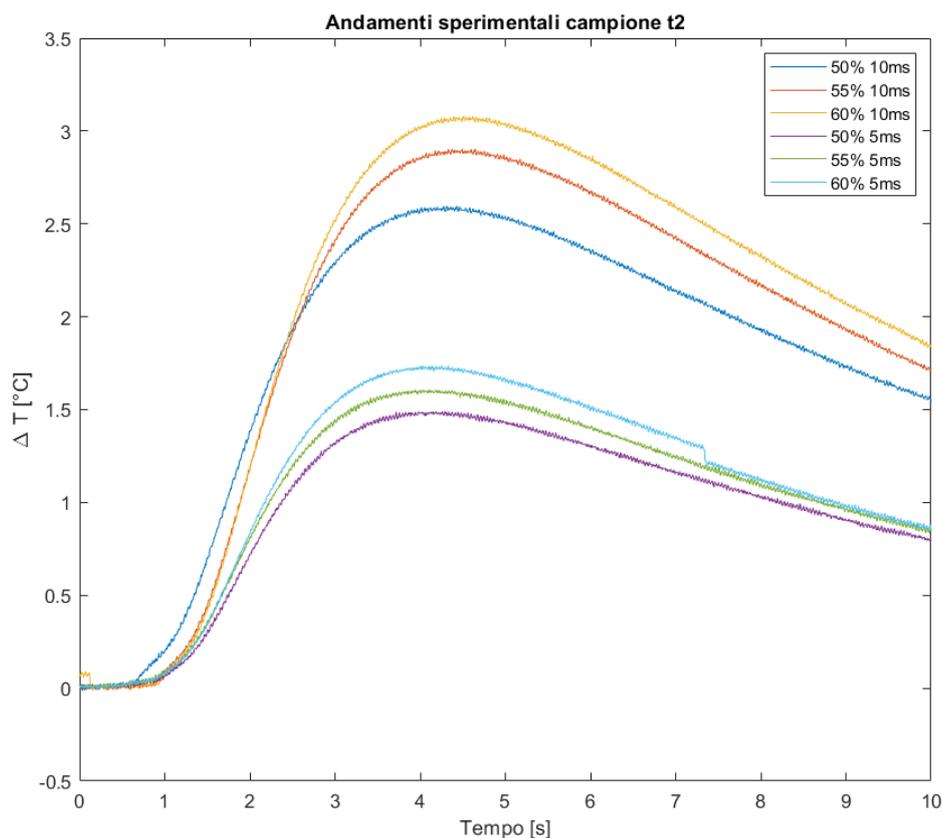


Figura 41: Andamenti di temperatura relativa per il campione t2

Anche in questo caso è possibile notare che entrambe le condizioni, sia sulla durata dell'impulso sia sulla frame rate, sono rispettate. Per cui è possibile calcolare sia il valore di diffusività che di conducibilità termica, i cui valori sono raccolti in Tabella 6:

Prova	c_p [J/kgK]	Massa [kg]	Volume [m ³]	ρ [kg/ m ³]	α [m ² /s]	λ [W/mK]
1	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,10E-07	0,0758
2	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,29E-07	0,0803
3	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,14E-07	0,0796
4	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,56E-07	0,0870
5	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,43E-07	0,0839
6	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,29E-07	0,0805

Tabella 6: Proprietà termiche campione t2

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il campione t2:

$$\lambda_{t2\ medio} = 0,0807 \frac{W}{mK}$$

Confrontando il seguente valore con quello presente in letteratura, riportato in Figura 39, si nota che il valore medio ottenuto dalle prove sperimentali è molto simile al valore di conducibilità proposto in letteratura.

4.3 Studio in temperatura

L'obiettivo del seguente studio è quello di comprendere in che modo varia la conducibilità termica al variare della temperatura. Come già precedentemente accennato nel capitolo 3, per poter raggiungere valori elevati di temperatura è necessario l'ausilio di un forno a Muffola impostato a 200°C, per preriscaldare i campioni t2 e t3 anneriti già impiegati nello studio a temperatura ambiente. Prima di procedere con la raccolta dati, risulta opportuno definire diversi parametri per i due provini:

- Set di otto prove per ciascun campione;
- Stessa configurazione della termocamera adottata nelle prove a temperatura ambiente;
- Stessa durata dell'impulso pari a 10ms ;
- Stessa potenza laser pari a 50%;
- Range di variazione delle temperatura fino a 90°C.

Nelle tabelle successive che raccolgono i dati per entrambi i campioni è indicato un parametro, ossia ΔT che consente di capire in modo immediato il livello di temperatura ottenuto per una specifica prova. Esso, infatti, è definito nel seguente modo:

$$\Delta T = T_{start} - T_0 \quad (4.2)$$

Dove:

- $T_0 = 26^\circ C$ rappresenta la temperatura ambiente di riferimento;
- T_{start} rappresenta il valore di temperatura del provino, relativo al momento in cui la termocamera inizia la registrazione.

Per ciascun campione analizzato si riporta uno studio di caratterizzazione termica per capire in quanto tempo esso raggiunge la temperatura del forno a Muffola. Ciò permette di comprendere il comportamento del campione in termini di capacità di assorbimento di calore, al fine di poter raggiungere uno specifico livello di temperatura. Nella fattispecie per la famiglia degli Alcen paper Denka il forno è impostato ad un valore di temperatura target pari a 200°C.

4.3.1 Campione t3

Definiti i parametri utili per eseguire le prove, in Tabella 7 sono presenti i dati sperimentali ottenuti per il set di otto prove:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.	ΔT
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]	[°C]
1	50	0,01	1,02	1,01	10	10,1	99,10	OK	OK	62
2	50	0,01	1,71	1,70	10	10,7	58,65	OK	OK	56
3	50	0,98	2,32	1,34	10	13,4	74,62	OK	OK	39
4	50	1,14	2,97	1,83	10	18,3	54,64	OK	OK	31
5	50	0,8	3,14	2,34	10	23,4	42,74	OK	OK	22
6	50	1,42	3,44	2,02	10	20,2	49,50	OK	OK	19
7	50	1,09	3,55	2,46	10	24,6	40,65	OK	OK	17
8	50	0,81	4,09	3,28	10	32,8	30,48	OK	OK	11

Tabella 7: Dati campione t3 in temperatura

Dato che le condizioni sulla durata dell'impulso e sul frame rate sono verificate, risulta possibile applicare la normativa per poter valutare le proprietà termiche del campione t3. Esse vengono riportate in Tabella 8:

Prova	c_p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	1,24E-06	0,2491
2	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	7,32E-07	0,1476
3	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	9,33E-07	0,1878
4	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	6,82E-07	0,1375
5	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	5,33E-07	0,1075
6	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	6,18E-07	0,1246
7	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	5,07E-07	0,1024
8	1130	1,14E-04	6,17E-07	184,7	3,81E-07	0,0769

Tabella 8: Proprietà termiche campione t3 in temperatura

Analizzando i dati raccolti, rispetto a quanto visto per le prove in temperatura ambiente, risulta abbastanza complesso registrare per ogni ΔT più valori di conducibilità, per cui non è possibile definire un valore medio di riferimento. La difficoltà nell'identificare più valori di conducibilità per ogni livello di temperatura è relazionata al fatto che risulta problematico, per un numero maggiore di prove, far partire la registrazione della termocamera ad un fissato T_{start} , causa scambio termico naturale tra campione preriscaldato e ambiente circostante.

Per il suddetto campione si riporta lo studio di caratterizzazione termica in Figura 42:



Figura 42: Caratterizzazione termica del campione t3

Osservando l'andamento sopra proposto emerge che per raggiungere la temperatura di target di 200°C sono necessari circa 15 minuti. Per poter monitorare progressivamente ed in modo agevole la temperatura del provino, risulta comodo l'ausilio di un pirometro che verrà utilizzato per tutte le prove in temperatura. Esso è riportato in Figura 43:



Figura 43: Pirometro per monitoraggio della temperatura del campione

4.3.2 Campione t2

Per il campione t2 si ripetono evidentemente gli stessi passaggi descritti per il campione t3. In particolar modo, si riportano in Tabella 9 i dati sperimentali ottenuti per il set di otto prove:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.	ΔT
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]	[°C]
1	50	0,35	1,43	1,08	10	10,8	99,59	OK	OK	60
2	50	0,82	1,84	1,02	10	10,2	98,03	OK	OK	52
3	50	0,83	1,97	1,14	10	11,4	87,72	OK	OK	45
4	50	1,19	2,21	1,02	10	10,2	98,04	OK	OK	40
5	50	0,9	2,00	1,10	10	11,0	90,90	OK	OK	33
6	50	0,29	1,72	1,43	10	14,3	69,93	OK	OK	27
7	50	0,1	1,53	1,43	10	14,9	67,11	OK	OK	21
8	50	0,34	1,86	1,52	10	15,2	65,79	OK	OK	18

Tabella 9: Dati campione t2 in temperatura

Dato che le condizioni sulla durata dell'impulso e sul frame rate sono verificate, risulta possibile applicare la normativa per poter valutare le proprietà termiche del campione t2. Esse vengono riportate in Tabella 10:

Prova	c_p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	5,14E-07	0,1258
2	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	5,44E-07	0,1332
3	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	4,87E-07	0,1192
4	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	5,44E-07	0,1333
5	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	5,04E-07	0,1237
6	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,88E-07	0,0953
7	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,72E-07	0,0915
8	1130	8,50E-05	3,97E-07	203,6	3,65E-07	0,0898

Tabella 10: Proprietà termiche campione t2 in temperatura

Come già precedentemente sottolineato per il campione t3, non è possibile raccogliere più dati per ciascun livello ΔT , per cui a differenza di quanto fatto per le prove a temperatura ambiente non ci saranno valori medi di conducibilità termica da manipolare.

In Figura 44 è riportato lo studio di caratterizzazione termica del campione t2:

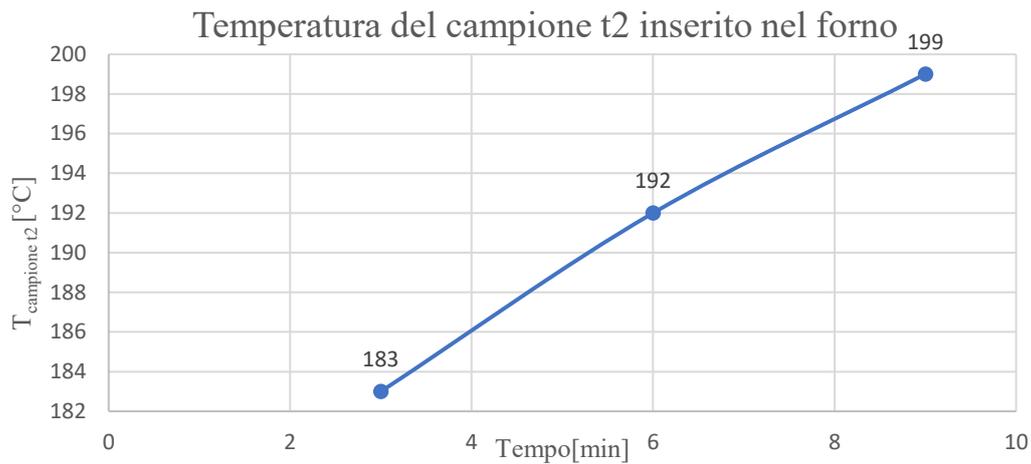


Figura 44: Caratterizzazione termica del campione t3

Anche in questo caso, con l'ausilio di un pirometro, osservando l'andamento sopra proposto emerge che per raggiungere la temperatura di target di 200°C sono necessari circa 9 minuti.

4.3.3 Andamenti di conducibilità termica

A questo punto è possibile riportare l'andamento di conducibilità termica in funzione del ΔT per entrambi i provini analizzati:

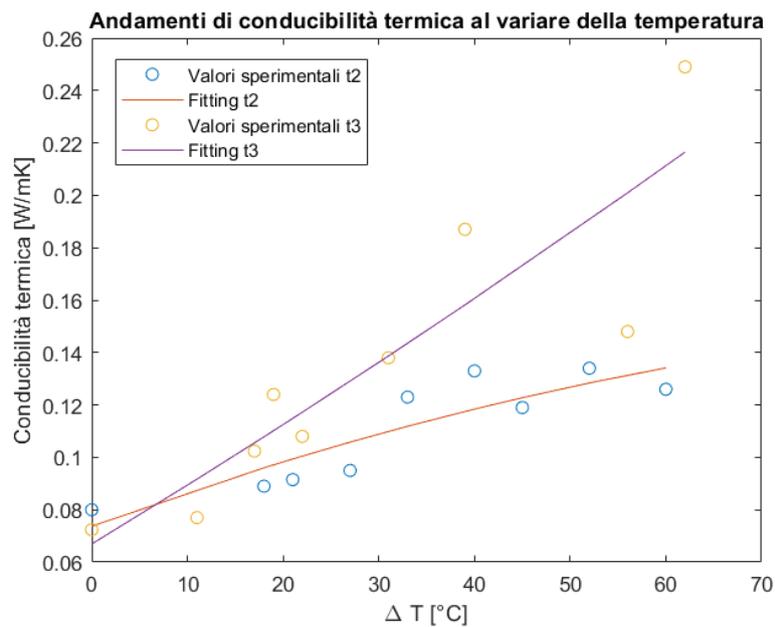


Figura 45: Confronto degli andamenti di conducibilità termica



I dati sperimentali sono stati interpolati sul software Matlab grazie alle funzioni *polyfit* e *polyval*. La funzione *polyfit* (x, y, n) determina il polinomio di ordine n che meglio si adatta alle coppie di punti x, y , in questo caso è stato scelto un secondo ordine; mentre *polyval* determina il risultato dell'applicazione del polinomio a un vettore di punti x .

4.4 Osservazioni

Dopo aver concluso sia lo studio a temperatura ambiente che in temperatura, si possono fare diverse considerazioni. Prima di tutto i valori medi di conducibilità termica a temperatura ambiente, ottenuti sia per il campione t2 che per il campione t3, risultano molto simili al valore medio riportato in letteratura. Dunque, è possibile sottolineare che la conducibilità non è altro che una proprietà intrinseca del materiale oggetto di studio. Naturalmente le leggere deviazioni che si registrano rispetto ai valori esatti proposti dall'azienda produttrice sono dovute alle approssimazioni introdotte, tra le quali emerge l'assunzione del trascurare le dispersioni di calore. Per quanto concerne le prove in temperatura si osserva che all'aumentare del ΔT , la conducibilità del campione t3 aumenta più rapidamente di quella del campione t2, nonostante la trasmittanza del campione t2 sia maggiore. Inoltre, entrambe gli andamenti non sono lineari. Questo tipo di studio si basa su pochi test, se si volessero ottenere risultati più precisi sarebbe necessario aumentare il numero di prove. Un altro aspetto non trascurabile è rappresentato dal fatto che non è semplice registrare i valori di conducibilità termica quando la temperatura aumenta, a causa degli scambi termici del campione con l'ambiente. Questa difficoltà aumenta alla temperature elevate, infatti per valori vicini a 85-90 [°C] l'andamento della temperatura registrato dalla termocamera non è uniforme. Tipicamente, per diversi plot con il 50% della potenza del laser è evidente che a valori elevati di ΔT il comportamento relativo al raffreddamento naturale è più forte dell'impulso ottenuto con il laser. Rispetto ai materiali che saranno studiati nei capitoli successivi, gli Alcen paper Denka resistono a temperature estremamente elevate vicine ai 1000°C per cui la scelta di impostare il forno a 200°C è finalizzata ad ottenere dei risultati validi con range di temperatura fino a 90°C. Si è scelto di non aumentare la temperatura della Muffola ulteriormente per ovviare a numerose possibili problematiche. Tra queste emergono da un lato la limitata resistenza dei fili della matrice di materiale siliconico presente nel porta campione per temperature superiori a 200°C, e dall'altra la difficoltà nell'afferrare il porta campione con il provino a temperature molto elevate. Sia per questi materiali che per i successivi che verranno studiati, per le prove in temperatura, il porta campione e il provino vengono sposati dalla Muffola alla strumentazione termografica grazie ad un guanto di materiale idoneo per le alte temperature. Evidentemente per temperature troppo elevate non sarebbe più possibile effettuare tale procedura con l'ausilio di un guanto, ma servirebbe identificare una soluzione possibilmente meno pratica rispetto al guanto stesso.

Capitolo 5

ITW Formex

Dopo aver analizzato nel capitolo precedente la prima famiglia di materiali, nel capitolo seguente si analizza la seconda famiglia di materiali disponibile, ossia gli ITW Formex GK-30BK. A differenza di quanto visto per gli Alcen paper Denka, in questo caso si analizzerà esclusivamente un campione per il quale si procederà prima con lo studio a temperatura ambiente e poi con lo studio in temperatura. L'azienda produttrice non fornisce numerose informazioni sia in termini di proprietà chimiche che di proprietà termiche. Dunque, per i risultati che si otterranno non sarà possibile identificare un riscontro valido.

5.1 Studio a temperatura ambiente

Prima di procedere con lo svolgimento delle prove sperimentali è necessario capire se conviene o meno annerire il campione per migliorarne le proprietà di assorbimento dell'impulso laser. In Figura 46 è riportato il foglio di materiale da quale sarà prelevato il provino oggetto di studio:



Figura 46: Foglio di ITW Formex

Analizzando il foglio di ITW Formex è evidente come non sia necessario opacizzare il campione stesso. In Figura 47 è riportato il campione che sarà studiato:

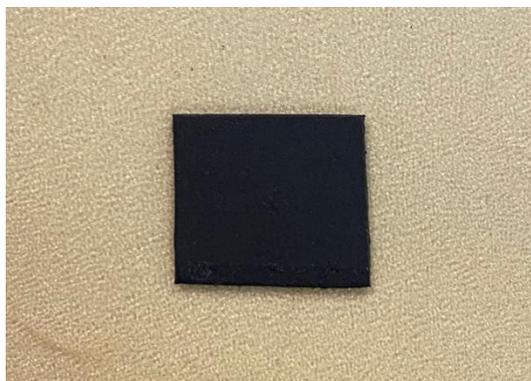


Figura 47: Campione ITW Formex 14,21x13,71x0,8 mm

Prima di eseguire i vari test è necessario configurare in modo opportuno la termocamera, i cui parametri sono riportati, con i rispettivi valori, in Tabella 11:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 11: Parametri della termocamera ITW Formex

Dato che lo spessore di tali materiali è molto ridotto, ossia 0,8 mm, risulta conveniente indagare il campione con delle durate di impulso consone. Infatti, per poter rispettare la condizione sulla durata dell'impulso si scelgono valori evidentemente contenuti (5-10ms). Inoltre, a differenza di quanto visto per entrambi i campioni della Alcen Denka, in questo caso il set di prove è esteso fino a 10, in modo da ricavare un valore medio approssimato dato che non è presente in letteratura un valore di confronto.

In Tabella 12 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione ITW Formex:

Prove	Potenza laser	t ₀	T _{ass1/2}	t _{1/2}	Durata Impulso	t _{1/2} /100	100/ t _{1/2}	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	11	0,31	1,39	1,08	10	10,8	92,59	OK	OK
2	20	0,17	1,21	1,04	10	10,4	69,15	OK	OK
3	30	0,30	1,46	1,16	10	11,6	86,20	OK	OK
4	40	,041	1,45	1,04	10	10,4	96,15	OK	OK
5	50	0,35	1,48	1,13	10	11,3	88,49	OK	OK
6	11	0,25	1,33	1,08	5	10,8	92,59	OK	OK
7	20	0,42	1,5	1,08	5	10,8	92,59	OK	OK
8	30	0,53	1,49	0,96	5	9,6	104,2	OK	OK
9	40	0,42	1,48	1,06	5	10,6	94,34	OK	OK
10	50	0,35	1,47	1,12	5	11,2	89,28	OK	OK

Tabella 12: Dati campione ITW Formex

Rispettate entrambe le condizioni imposte dalla normativa, si possono calcolare le proprietà termiche del seguente campione rispettivamente con la (3.1) e la (4.1). Il valore di calore specifico è estratto direttamente dal sito dell'azienda produttrice:

Material Properties of Formex - Electrical Insulator, Barrier

Property	Metric	units	English	units
General				
Density	982 - 1.16e3	kg/m ³	0.0355 - 0.0418	lb/ft ³
Mechanical				
Yield Strength	2.37e7 - 3.15e7	Pa	3.44 - 4.57	ksi
Tensile Strength	2.1e7 - 2.3e7	Pa	3.04 - 3.33	ksi
Elongation	0.258 - 0.705	% strain	25.8 - 70.5	% strain
Hardness (Vickers)	7.85e7 - 8.24e7	Pa	8 - 8.41	HV
Impact Strength (unnotched)	1.81e4 - 4.04e4	J/m ²	8.62 - 19.2	ft.lbf/in ²
Fracture Toughness	1.41e6 - 1.48e6	Pa/m ^{0.5}	1.28 - 1.134	ksi/in ^{0.5}
Young's Modulus	1.5e9 - 2.08e9	Pa	0.218 - 0.302	10 ⁶ psi
Thermal				
Max Service Temperature	80.6 - 103	°C	177 - 218	°F
Melting Temperature	161 - 170	°C	322 - 338	°F
Insulator or Conductor				
Insulator or Conductor	Insulator		Insulator	
Specific Heat Capability	1.67e3 - 1.71e3	J/kg °C	0.399 - 0.407	BTU/lb. °F
Thermal Expansion Coefficient	5.6e-5 - 6.42e-5	strain/°C	31.1 - 35.7	μstrain/°F

Figura 48: Calore specifico ITW Formex

Per il seguente lavoro di tesi si è deciso di implementare il valore di 1670 J/kgK.

Anche in questo caso le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 49 e 50:

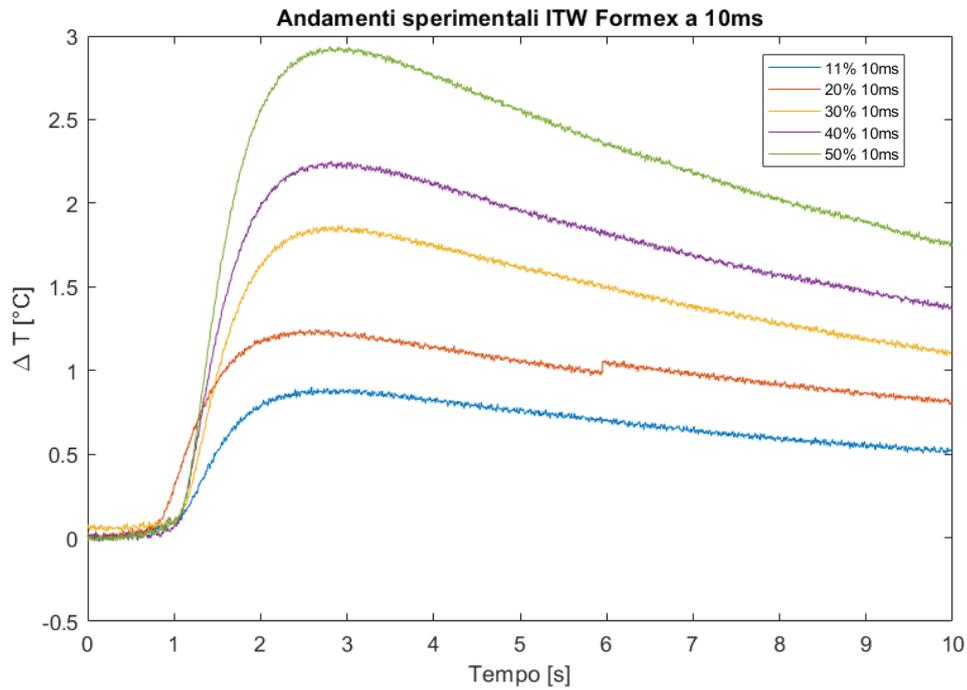


Figura 49: Andamenti di temperatura relativa per il campione ITW Formex 10ms

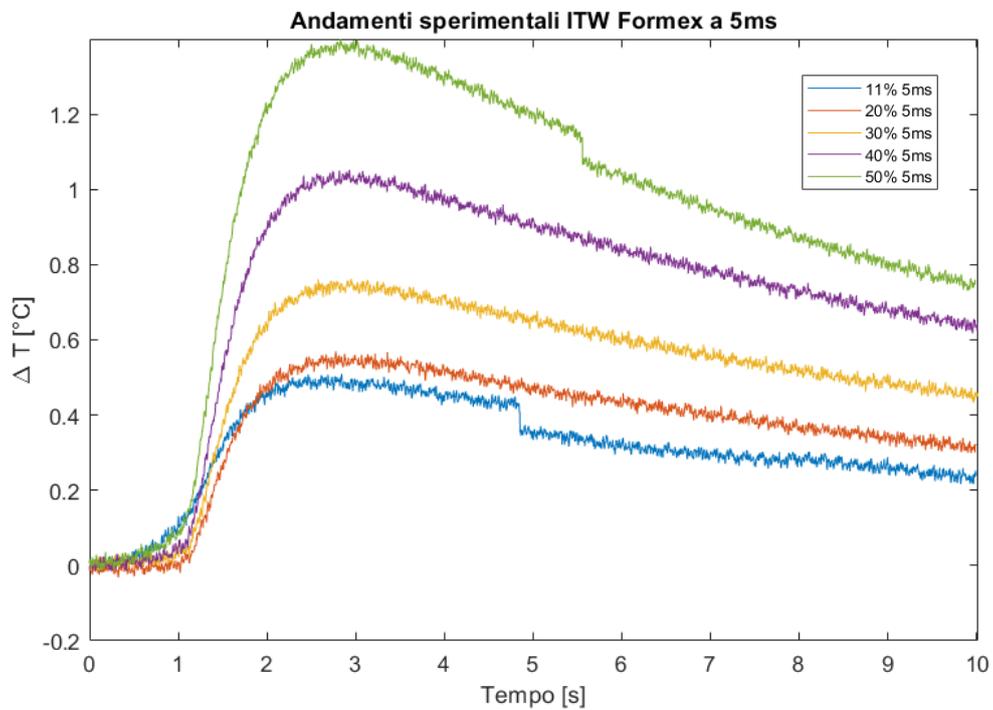


Figura 50: Andamenti di temperatura relativa per il campione ITW Formex 5ms

Per quanto concerne invece il valore di densità, anche in questo caso si è utilizzato un calibro digitale per misurare accuratamente il provino nelle tre dimensioni ed una bilancia digitale che permette un lettura corretta del valore di massa. In Tabella 13 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova	c_p [J/kgK]	Massa [kg]	Volume [m ³]	ρ [kg/ m ³]	α [m ² /s]	λ [W/mK]
1	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,22E-08	0,133
2	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,54E-08	0,138
3	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	7,66E-08	0,124
4	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,54E-08	0,138
5	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	7,86E-08	0,127
6	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,22E-08	0,133
7	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,22E-08	0,133
8	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	9,25E-08	0,150
9	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	8,38E-08	0,136
10	1670	1,51E-04	1,55E-07	968,6	7,93E-08	0,128

Tabella 13: Proprietà termiche campione ITW Formex

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il campione ITW Formex:

$$\lambda_{ITW Formex medio} = 0,134 \frac{W}{mK}$$

5.2 Studio in temperatura

Anche per il provino di materiale ITW Formex, l'obiettivo di tale studio è quello di comprendere in che modo varia la conducibilità termica al variare della temperatura. Come già accennato nel capitolo 3, per poter raggiungere valori elevati di temperatura è necessario l'ausilio di un forno a Muffola impostato, per preriscaldare il campione già utilizzato nello studio a temperatura ambiente. Prima di procedere con la raccolta dati, risulta opportuno capire a che temperatura impostare il forno:

PHYSICAL PROPERTIES					
Density - gm/cc	ASTM D-792	1.035	1.035	1.035	1.035
Flammability	UL 94	VTM-0	VTM-0	V-0	V-0
Oxygen Index	ASTM D-2863	29	29	29	29
Water Absorption - % change in weight	ASTM D-570	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%
Heat Deflection Temperature at 66 psi	ASTM D-648	121°C/250°F	121°C/250°F	121°C/250°F	121°C/250°F
Relative Thermal Index	UL 746B				
Electrical		115°C/239°F	115°C/239°F	115°C/239°F	115°C/239°F
Mechanical Without Impact		115°C/239°F	115°C/239°F	115°C/239°F	115°C/239°F
Surface Energy - dynes/cm (as produced)	ASTM D-2578	: 50 outside only**	: 50	: 50	: 50

Figura 51: Massima temperatura a cui resiste un ITW Formex

L'ultima colonna della tabella riportata in Figura 51 si riferisce alle proprietà del provino ITW Formex GK-30BK oggetto di studio. Qualora la temperatura target del forno fosse pari a quella utilizzata per la famiglia degli Alcen Denka, dopo un certo intervallo di tempo il materiale ITW risulta danneggiato. Per verificare la seguente condizione sono stati utilizzati dei campioni ausiliari ITW Formex, i quali sono stati inseriti nella Muffola per una durata di circa 15 minuti. In Figura 52 si possono osservare gli effetti negativi che le alte temperature introducono sui tali materiali:

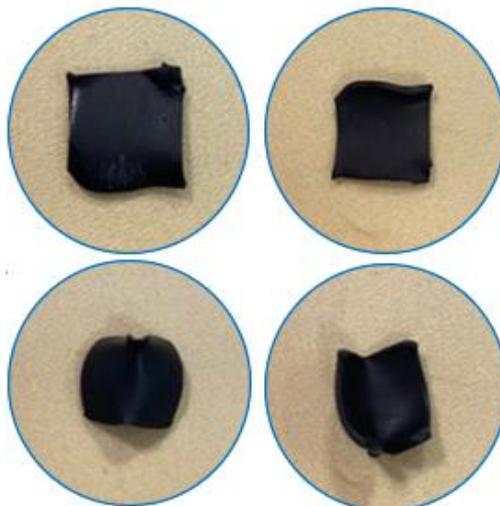


Figura 52: Campioni ITW danneggiati alle elevate temperature

Per questo motivo la temperatura target del forno sarà impostata a 100°C. Mantenendo costanti i parametri della termocamera, in Tabella 14 si riportano i dati sperimentali ottenuti per un set di sei prove:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.	ΔT
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]	[°C]
1	40	1,22	1,49	0,27	5	2,7	370,37	NO	OK	47
2	40	0,88	1,27	0,39	5	3,9	256,41	NO	OK	42
3	40	1,15	1,44	0,29	5	2,9	344,83	NO	OK	41
4	30	1,12	1,44	0,32	5	3,2	312,50	NO	OK	34
5	30	1,02	1,44	0,42	5	4,2	238,09	NO	OK	27
6	30	1,02	1,50	0,48	5	4,8	208,33	NO	OK	19

Tabella 14: Dati campione ITW Formex in temperatura

Osservando i risultati raccolti emerge che la condizione sulla durata dell'impulso non è rispettata. Per cui non è possibile da normativa calcolare le proprietà termiche del seguente materiale.

In Figura 53 è riportato lo studio di caratterizzazione termica del campione analizzato:

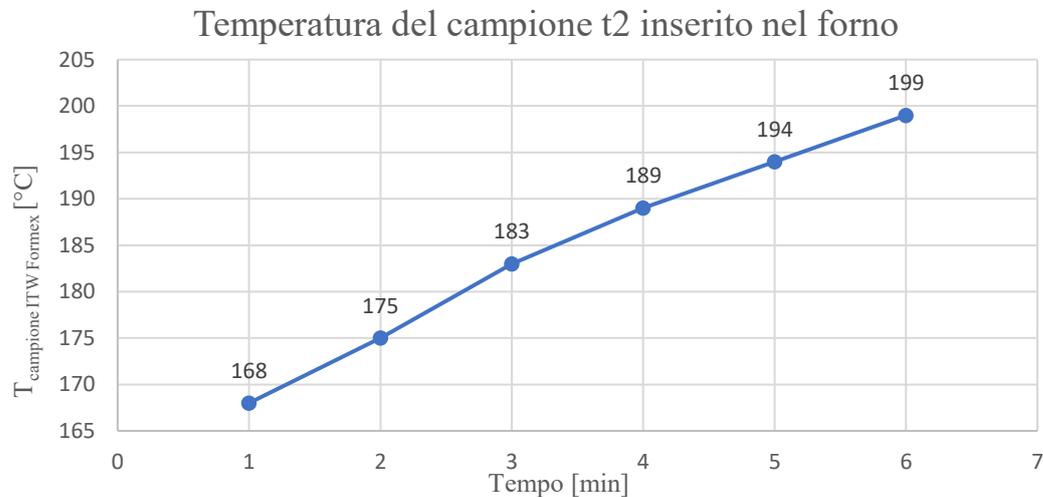


Figura 53: Caratterizzazione termica del campione ITW Formex

Anche in questo caso, con l'ausilio di un pirometro, osservando l'andamento sopra proposto si nota che per raggiungere la temperatura di target di 100°C sono necessari circa 6 minuti, essendo il campione molto sottile.

5.3 Osservazioni

Dopo aver concluso l'analisi della seguente famiglia di materiali è possibile fare diverse considerazioni. Prima di tutto nello studio a temperatura ambiente è stato considerato un set cospicuo per poter ottenere un'indicazione precisa sulla conducibilità termica. Come già accennato precedentemente non è possibile confrontare il valore medio di conducibilità ottenuto dato che non sono presenti informazioni da parte dell'azienda produttrice. Si può considerare evidentemente la validità del metodo che ha fornito delle indicazioni interessanti nel capitolo precedente nel confronto tra i risultati sperimentali e quelli presenti in letteratura. Per quanto concerne le prove in temperatura, non è stato possibile ottenere alcun tipo di risultato adeguato dato che la condizione sulla durata dell'impulso non risulta rispettata. Dato lo spessore del provino una soluzione possibile per poter valutare in temperatura le proprietà termiche è rappresentata dall'aumento dello spessore complessivo del provino stesso. Si possono unire due campioni per creare un unico strato utilizzando ad esempio del grasso al grafene, il quale permette di far aderire i due strati.

Capitolo 6

Stokvis GY

Nel capitolo seguente si analizza la terza famiglia di materiali, ossia Stokvis GY 430059. La procedura da seguire per poter indagare tali materiali è la stessa descritta nei due capitoli precedenti. Così come per gli ITW Formex, solamente un campione sarà analizzato. L'azienda produttrice non fornisce numerose informazioni circa il materiale oggetto di studio; tuttavia, in letteratura sono presenti diversi studi che consentiranno di confrontare i risultati ottenuti sperimentalmente. L'analisi degli Stokvis GY sarà prima focalizzata sullo studio a temperatura ambiente e successivamente su quello in temperatura.

6.1 Studio a temperatura ambiente

Prima di eseguire le prove sperimentali risulta opportuno capire se annerire o meno il campione. In Figura 54 è riportato il materiale di poliolefine fornito dall'azienda produttrice, dal quale prelevare il campione che sarà successivamente analizzato:



Figura 54: Foglio di Stokvis GY

Così come per gli ITW Formex, il materiale non necessita di essere annerito con la bomboletta spray. Per cui è sufficiente ricavare un campione, il quale viene raffigurato di seguito:



Figura 55: Campione Stokvis GY 14,53x14,33x3,67 mm

Prima di eseguire i vari test si configura la termocamera, i cui parametri sono riportati, in Tabella 15:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 15: Parametri della termocamera Stokvis GY

In Tabella 15 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	50	0,34	2,24	1,90	10	19,0	52,63	OK	OK
2	55	0,26	2,00	1,74	10	17,4	57,47	OK	OK
3	60	0,32	2,07	1,75	10	17,5	57,14	OK	OK
4	50	0,24	1,48	1,24	5	12,4	80,64	OK	OK
5	55	0,25	1,49	1,23	5	12,3	81,30	OK	OK
6	60	0,27	1,47	1,20	5	12,0	83,33	OK	OK

Tabella 16: Dati campione Stokvis GY

Entrambe le condizioni richieste da normativa sono rispettate, considerato lo spessore elevato del campione pari a 3,67 mm. La famiglia delle poliolefine comprende polimeri termoplastici come polipropilene e polietilene (differenziati per caratteristiche fisico-meccaniche e per il processo di polimerizzazione utilizzato), ma anche elastomeri come poliisobutilene ed etilene. È difficile trovare in letteratura un valore di calore specifico preciso per questa famiglia di materiali. Esso è prelevato direttamente da [18]:

Material	Specific Heat Capacity, C.	
	kJ/kg-°C	Btu/lb°F
Metals		
Aluminum and its alloys	0.9	0.22
Aluminum tin	0.96	0.23
Babbitt, lead-based white metal	0.15	0.036
Babbitt, tin-based white metal	0.21	0.05
Brasses	0.39	0.093
Bronzes	0.38	0.091
Copper ^a	0.38	0.091
Copper lead	0.32	0.076
Iron, cast	0.42	0.10
Iron, porous	0.46	0.11
Iron, wrought	0.46	0.11
Magnesium alloys	1.0	0.24
Steels ^b	0.45	0.11
Zinc alloys	0.4	0.096
Polymers		
Thermoplastics	1.4	0.33
Thermosets	---	---

Figura 56: Calore specifico Stokvis GY

Per il seguente lavoro di tesi sarà scelto il valore di 1400 J/kgK.

Le informazioni di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 57 e 58:

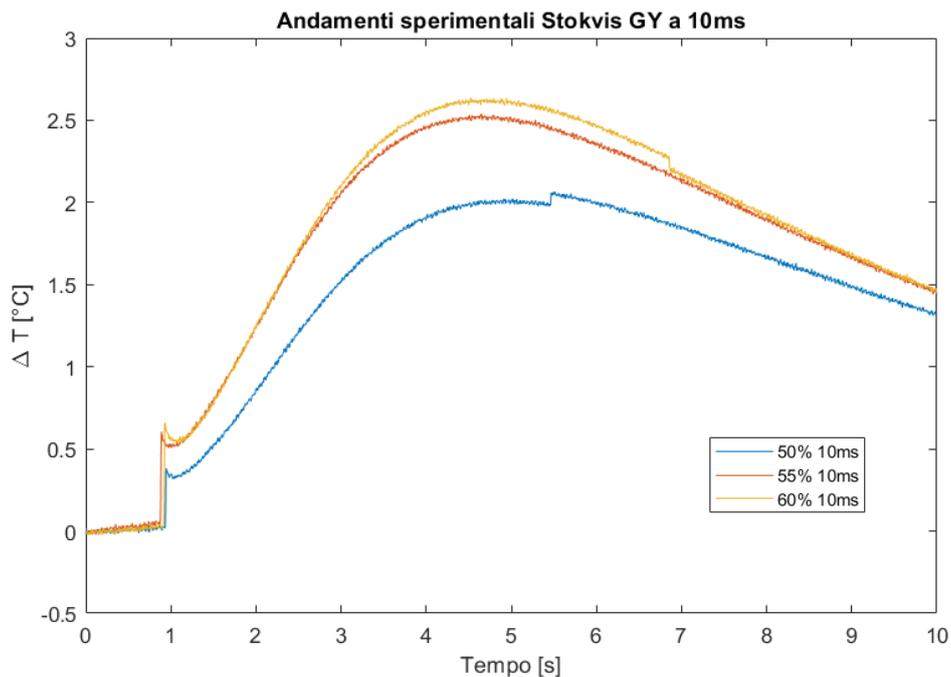


Figura 57: Andamenti di temperatura relativa per il campione Stokvis GY 10ms

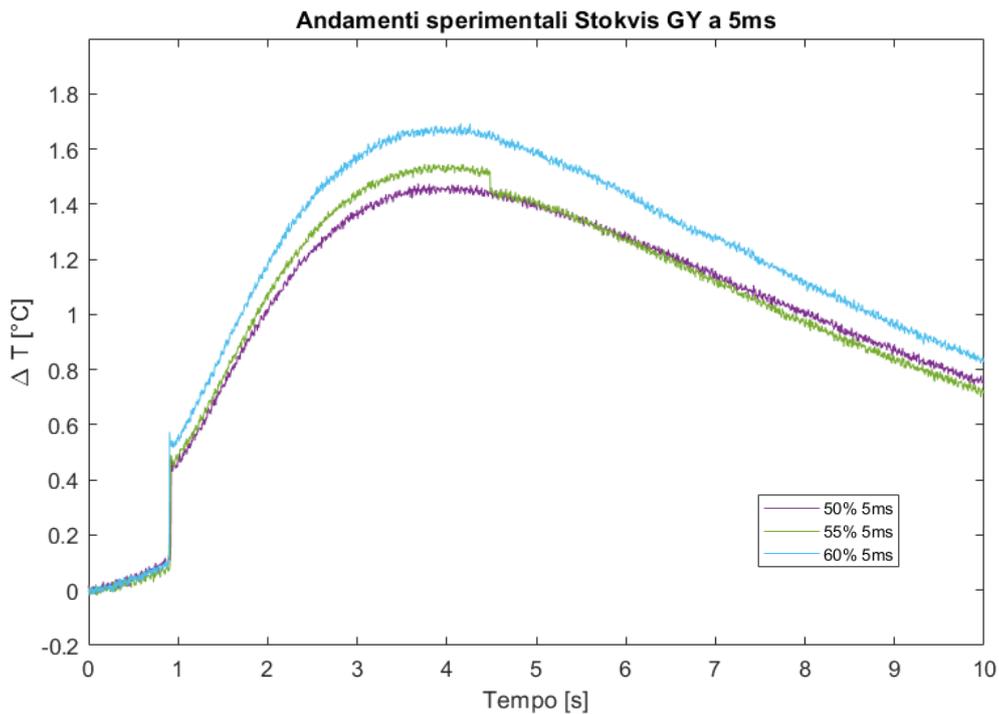


Figura 58: Andamenti di temperatura relativa per il campione Stokvis GY 5ms

La scelta di non inserire gli andamenti delle figure precedenti in uno stesso grafico è giustificata dal fatto che i singoli andamenti tenderebbero a sovrapporsi; dunque, per una migliore comprensione sono stati divisi. Inoltre, nonostante i seguenti materiali siano più spessi degli altri già precedentemente studiati, non è possibile utilizzare potenze laser superiori al 60% poiché il provino rischia di essere danneggiato. Tale condizione è stata verificata con un campione ausiliario sottoposto a potenze laser ripetute, superiori al 60%:

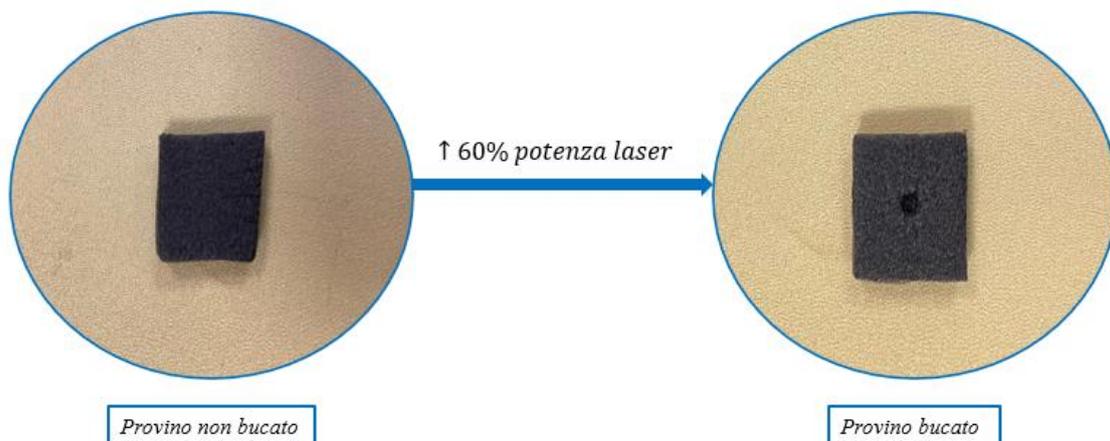


Figura 59: Effetti dell'aumento della potenza laser

Anche in questo caso per stimare la densità, si è utilizzato da un lato un calibro digitale per misurare accuratamente il provino nelle tre dimensioni e dall'altro una bilancia digitale estremamente sensibile che permette una lettura corretta del valore di massa. In Tabella 16 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova	c_p [J/kgK]	Massa [kg]	Volume [m ³]	ρ [kg/ m ³]	α [m ² /s]	λ [W/mK]
1	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,10E-07	0,0758
2	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,29E-07	0,0803
3	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,14E-07	0,0796
4	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,56E-07	0,0870
5	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,43E-07	0,0839
6	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	3,29E-07	0,0805

Tabella 17: Proprietà termiche campione Stokvis GY

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il campione Stokvis GY:

$$\lambda_{Stokvis\ GY\ medio} = 0,070 \frac{W}{mK}$$

Esistono poche indicazioni in letteratura sui valori di conducibilità termica per i seguenti materiali; grazie ad uno studio presente in [19] è possibile confrontare il valore medio ottenuto sperimentalmente con quelli registrati per il seguente studio, validi per schiume poliolefiniche:

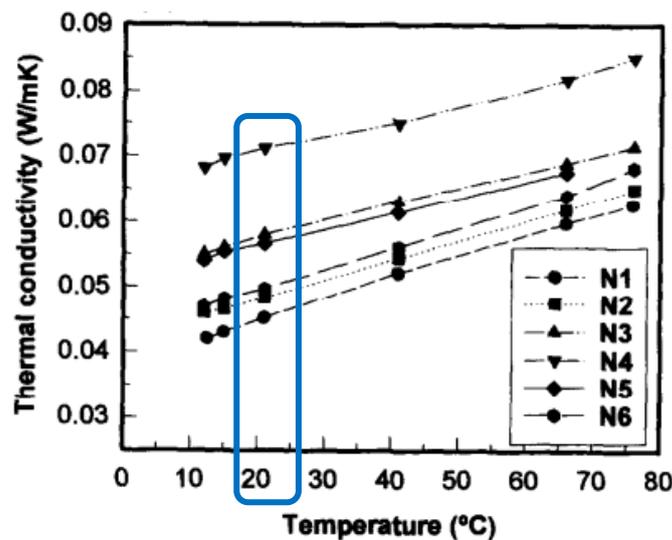


Figura 60: Conducibilità termica poliolefine

Il valore ottenuto sperimentalmente si avvicina molto al valore presente in letteratura valido per i materiali di tentativo N4 descritti in [19].

6.2 Studio in temperatura

Concluso lo studio a temperatura ambiente, si affronta l'ultima parte dell'analisi sperimentale, ossia lo studio in temperatura. È necessario capire a che livello di temperatura impostare il forno in modo da ovviare a possibili problemi di danneggiamento del campione già utilizzato per lo studio a temperatura ambiente. In Figura 61 è riportato uno schema riassuntivo fornito dall'azienda produttrice che racchiude l'informazione di interesse:

430059GY		
Crosslinked polyolefine foam.		
Carrier:	Crosslinked polyolefine foam	
Density:	29 ±3,5 kg/m ³	ISO 845
Colour:	Grey	
Thickness:	4 ±0,34 mm	ISO 1923
Tensile strength:		ISO 1926
Longitudinal	240 ±60 kPa	
Transversal	160 ±40 kPa	
Elongation:		ISO 1926
Longitudinal	120 ±40%	
Transversal	85 ±25%	
Compression stress/strain:		ISO 3386-1
deflection 10%	16 ±8 kPa	
deflection 25%	38 ±11 kPa	
deflection 40%	72 ±12 kPa	
deflection 50%	110 ±30 kPa	
Compression set (deflection 25%):		ISO 1856-C
0,5h after discharge	21 - 6/+3 %	
24h after discharge	12,4 ±3,7 %	
Shore hardness:		
Shore A	6 ±1	ISO 868-1985
Shore 0	12 ±1	ASTM D2240
Shore 00	48 ±5	
Water absorption:	1%	ISO 2896
Temperature resistance:	max +100°C	

Figura 61: Massima temperatura a cui resiste uno Stokvis GY

Da come si nota, la temperatura massima di esercizio per tali materiali è intorno ai 100°C. Per tale motivo il forno verrà configurato ad un valore non superiore a tale livello.

Risulta opportuno definire diversi parametri per il campione analizzato in temperatura:

- Set di otto prove;
- Stessa configurazione della termocamera adottata nelle prove a temperatura ambiente;
- Stessa durata dell'impulso pari a 5ms per ogni prova;
- Stessa potenza laser pari a 50% per ogni prova;
- Range di variazione delle temperatura fino a 50°C.

Si riportano in Tabella 18 i dati sperimentali raccolti in temperatura

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.	ΔT
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]	[°C]
1	50	0,83	1,64	0,81	5	8,1	123,45	OK	OK	24
2	50	2,08	2,83	0,75	5	7,5	133,33	OK	OK	22
3	50	0,59	1,53	0,94	5	9,4	106,38	OK	OK	20
4	50	0,62	1,76	1,14	5	11,4	87,72	OK	OK	15
5	50	0,36	1,46	1,10	5	11,0	90,90	OK	OK	14
6	50	0,91	3,28	2,37	5	23,7	42,15	OK	OK	12
7	50	0,27	1,4	1,13	5	11,3	88,50	OK	OK	11
8	50	0,62	1,82	1,20	5	12	83,33	OK	OK	9

Tabella 18: Dati campione Stokvis GY in temperatura

Dato che le condizioni sulla durata dell'impulso e sul frame rate sono verificate, risulta possibile applicare la normativa per poter valutare le proprietà termiche del campione. Esse vengono riportate in Tabella 19:

Prova	c_p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	2,30E-06	0,126
2	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	2,49E-06	0,136
3	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	1,98E-06	0,108
4	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	1,64E-06	0,089
5	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	1,69E-06	0,092
6	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	7,88E-06	0,043
7	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	1,65E-06	0,090
8	1400	2,97E-05	7,64E-07	38,8	1,55E-06	0,085

Tabella 19: Proprietà termiche Stokvis GY in temperatura

In Figura 62 è riportato lo studio di caratterizzazione termica del campione analizzato:

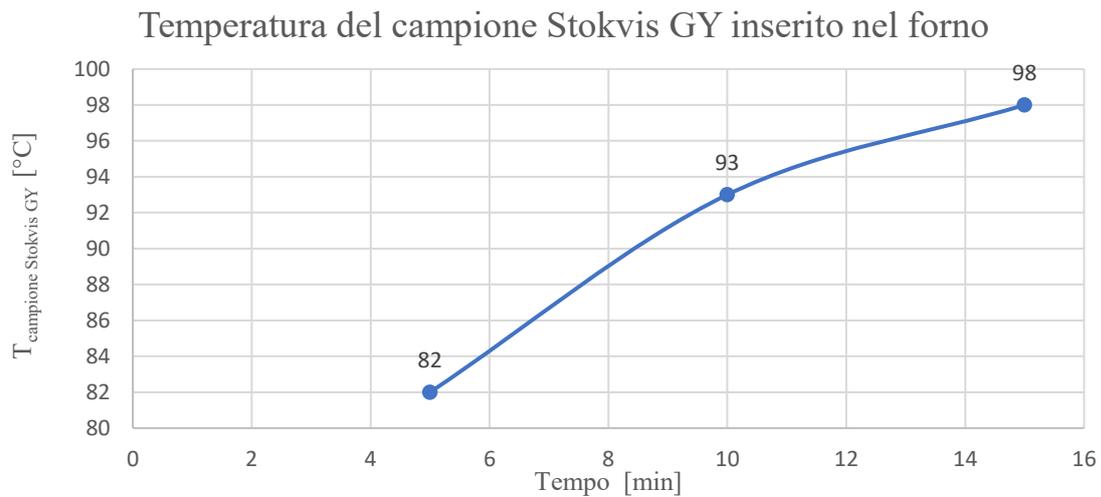


Figura 62: Caratterizzazione termica del campione Stokvis GY

Anche in questo caso, con l'ausilio di un pirometro, osservando l'andamento sopra proposto si nota che per raggiungere la temperatura di target di 100°C sono necessari circa 15 minuti, essendo il campione abbastanza spesso.

Ottenute le seguenti informazioni può essere interessante analizzare l'andamento della conducibilità termica al variare della temperatura. Esso è proposto in Figura 63:

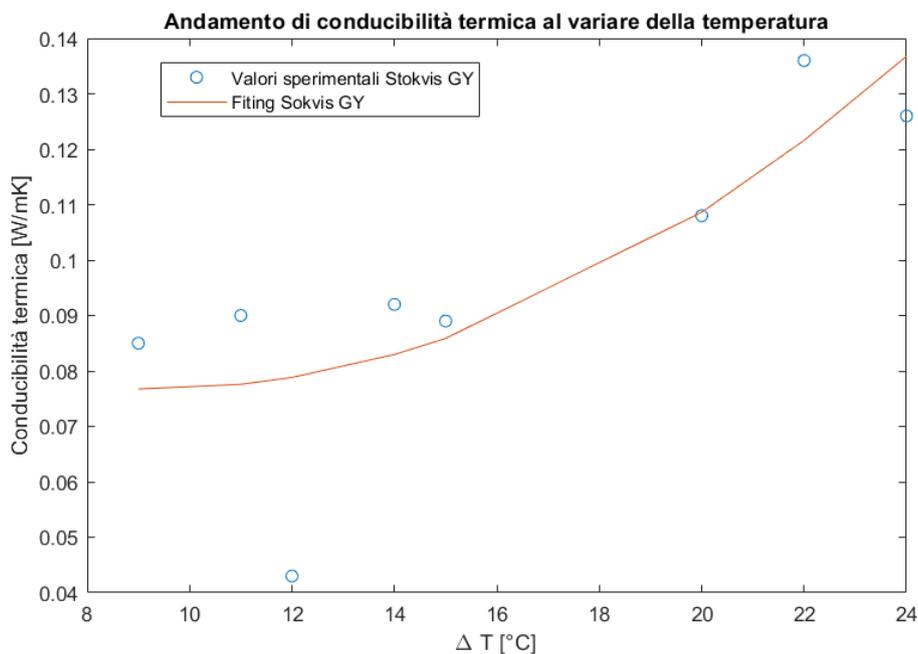


Figura 63: Andamento di conducibilità termica



Così com'è stato già visto per la famiglia Alcen paper Denka, i dati sperimentali sono stati interpolati sul software Matlab grazie alle funzioni *polyfit* e *polyval*. La funzione *polyfit* (x, y, n) determina il polinomio di ordine n che meglio si adatta alle coppie di punti x, y , in questo caso è stato scelto un secondo ordine; mentre *polyval* determina il risultato dell'applicazione del polinomio a un vettore di punti x .

6.3 Osservazioni

Una volta conclusi l'indagine sperimentale è possibile concentrare l'attenzione su diversi aspetti. Per quanto concerne le prove a temperatura ambiente, il valore medio di conducibilità estratto direttamente dalle prove sperimentali risulta essere molto vicino ai valori riportati in letteratura. Analizzando invece le prove in temperatura emerge che l'andamento di conducibilità ottenuto al variare di ΔT non è lineare. In particolare, essa aumenta all'aumentare del ΔT . Questo tipo di studio si basa su pochi test, se si volessero ottenere risultati più precisi sarebbe necessario aumentare il numero di prove. Non è semplice registrare i valori di conducibilità termica quando la temperatura aumenta, a causa degli scambi termici del campione con l'ambiente. Questa difficoltà aumenta alla temperatura elevata, infatti a vicino a 50°C gli andamenti di temperatura forniti dalla termocamera non sono uniformi. Un altro aspetto particolare che è possibile osservare, è rappresentato dal picco iniziale in corrispondenza del transitorio di riscaldamento. Come descritto in [17] esso può essere dovuto alla luce trasmessa e/o diffusa dall'impulso laser e/o al rumore indotto elettricamente associato alla scarica dell'impulso laser.

Capitolo 7

Busbar batteries 520-PHEV

Questo capitolo è dedicato all'analisi dell'ultima famiglia di materiali oggetto di studio, ossia i Busbar batteries 520-PHEV. Si tratta di tre materiali in PVC che saranno sottoposti esclusivamente ad uno studio a temperatura ambiente, poiché come sarà chiarito in seguito non è possibile svolgere prove in temperatura senza comprometterne l'integrità. I materiali a disposizione sono riportati in Tabella 20:

Provino [-]	Spessore [mm]
PVC BB flessibile	1,13
Guaina campione 1	1,65
Nastro	0,54

Tabella 20: Campioni Busbar batteries 520-PHEV disponibili

7.1 PVC BB flessibile

In Figura 64 è riportato il materiale oggetto di indagine:

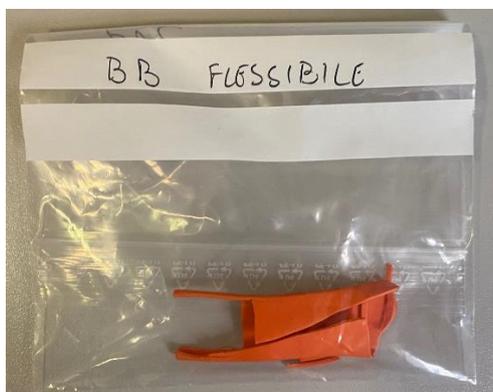


Figura 64: Materiale PVC flessibile BB

A partire dal materiale, è possibile ricavare il campione che sarà sottoposto ad analisi a temperatura ambiente.

7.1.1 Studio a temperatura ambiente

Prima di svolgere le prove sul seguente materiale, risulta opportuno annerire la superficie grazie ad un bomboletta spray per poter migliorare l'assorbimento dell'informazione inviata dal laser. In Figura 65 è raffigurato il campione di partenza e quello opacizzato:

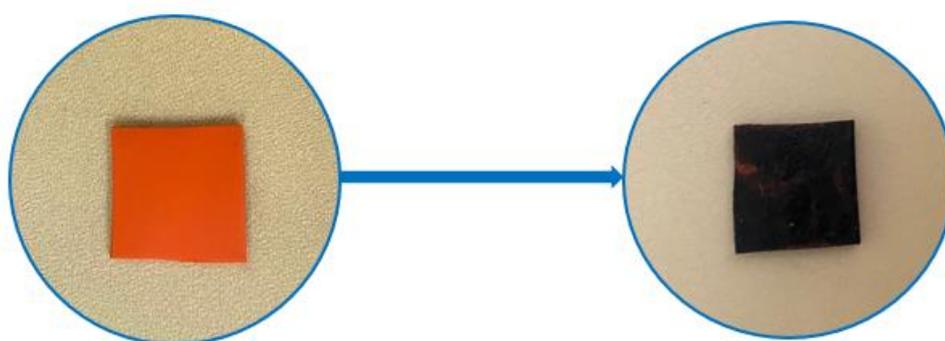


Figura 65: Campione PVC BB flessibile 14, 66x14,06x1,13 mm

Prima di eseguire i vari test si configura la termocamera, i cui parametri sono riportati, in Tabella 21:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 21: Parametri della termocamera PVC BB flessibile

Dato che lo spessore di tali materiali è molto ridotto, ossia 1,13 mm, risulta conveniente indagare il campione con delle durate di impulso consone. Infatti, per poter rispettare la condizione sulla durata dell'impulso si sceglie il valore di 5ms.

In Tabella 22 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione PVC BB flessibile:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	30	0,5	1,99	1,45	5	14,5	68,97	OK	OK
2	40	0,52	1,94	1,42	5	14,2	70,42	OK	OK
3	50	0,39	1,83	1,44	5	14,4	69,44	OK	OK
4	60	0,42	1,87	1,45	5	14,5	69,96	OK	OK
5	70	0,40	1,87	1,47	5	14,7	68,02	OK	OK
6	80	0,40	1,85	1,45	5	14,5	68,97	OK	OK

Tabella 22: Dati campione PVC BB flessibile

Le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 66:

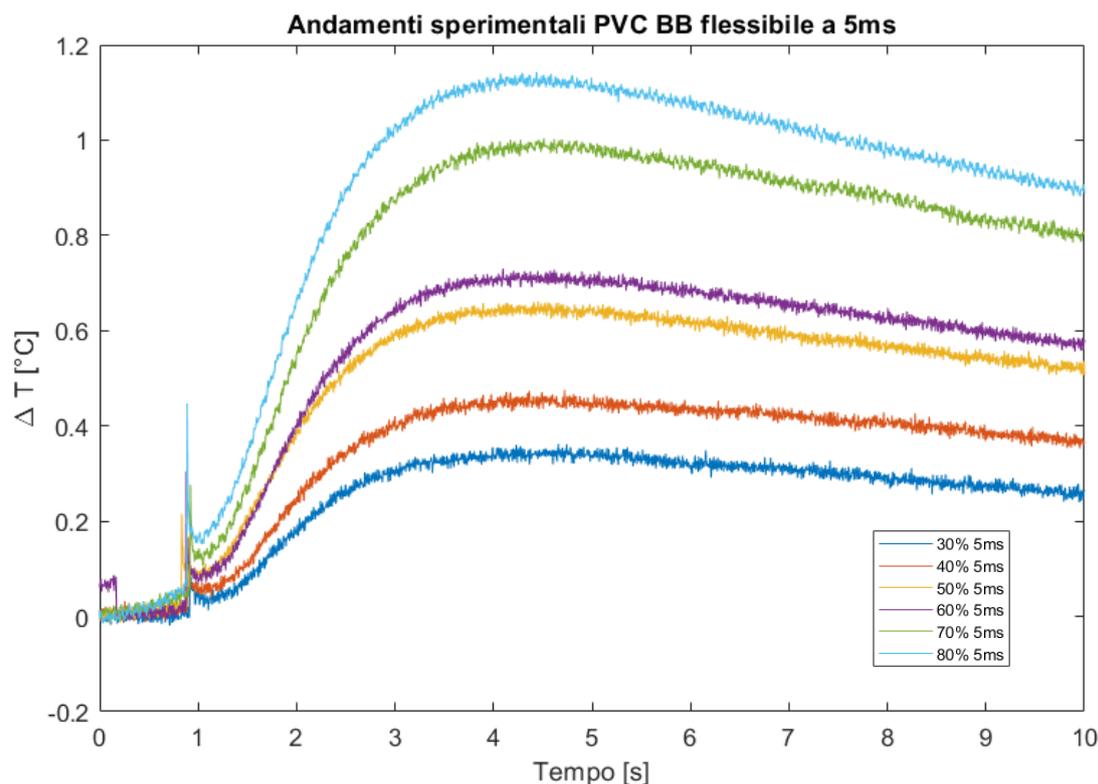


Figura 66: Andamenti di temperatura relativa per il campione PVC flessibile 5ms

Osservando da un lato gli andamenti sperimentali e dall'altro i risultati tabellati, emerge il fatto che entrambe le condizioni, sia sulla durata dell'impulso sia sulla frame rate, sono rispettate. Dunque, è possibile calcolare sia la diffusività termica che la conducibilità.

Il valore di calore specifico utilizzato per i seguenti materiali in PVC, presente in letteratura, è riportato in Figura 67:

Proprietà	UM	Metodo	Valore
PROPRIETA' TECNICHE GENERALI			
Densità	G / cm ³	ISO 1183-DIN53479-ASTM D 792	1,22
Conformità alimentare (USA)	-	FDA	NO
Conformità alimentare (CE)	-	1935/2004-10/2011	NO
PROPRIETA' MECCANICHE			
Resistenza a trazione, alla rottura	N/mm ²	ISO 527	16
Allungamento a rottura	%	ISO 527	340
Allungamento residuo dopo la rottura	%	ISO 527	68
Durezza Shore A	Sh a	EN ISO 868	80
Resistenza alla lacerazione	N / mm	DIN 53515	50
PROPRIETA' TERMICHE			
Temperatura minima di utilizzo	C°	EN 1876	-15
Temperatura massima di utilizzo	C°	EN 1876	50
Calore specifico	Kj / kg K	ISO 11357	1,6

Figura 67: Calore specifico materiali in PVC

Per il seguente lavoro di tesi si è deciso di implementare il valore di 1600 J/kgK.

Per quanto concerne invece il valore di densità, si è utilizzato un calibro digitale per misurare il provino nelle tre ed una bilancia digitale estremamente sensibile. In Tabella 23 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova	c _p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,255
2	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,230
3	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,227
4	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,225
5	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,222
6	1600	2,68E-04	2,33E-07	1150,6	1,22E-07	0,225

Tabella 23: Proprietà termiche PVC BB flessibile

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il PVC BB flessibile:

$$\lambda_{PVC\ BB\ flessibile\ medio} = 0,226 \frac{W}{mK}$$

Esistono poche indicazioni in letteratura sui valori di conducibilità termica per i seguenti materiali.

Grazie ad uno studio presente in [20] è possibile confrontare il valore medio ottenuto sperimentalmente con quelli registrati per il seguente studio:

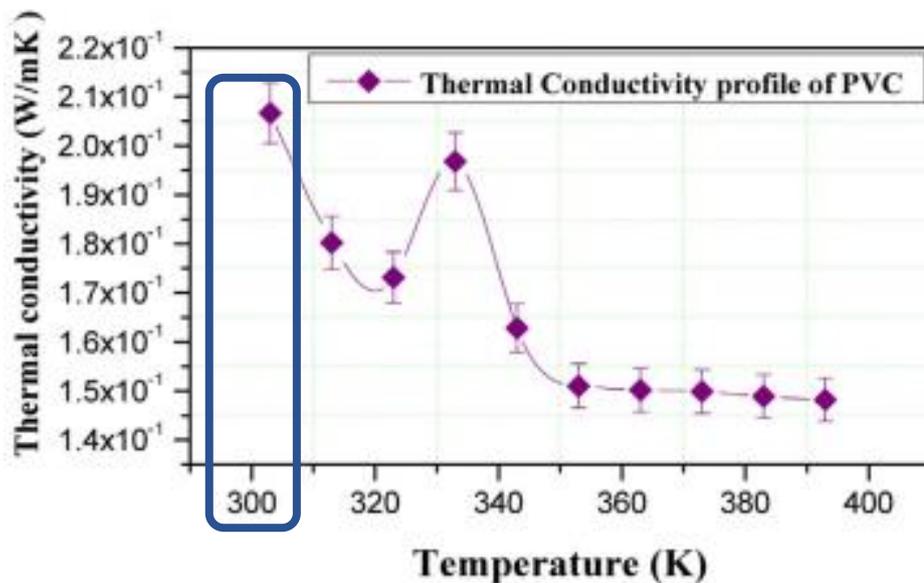


Figura 68: Conducibilità termica simile al PVC BB flessibile

7.1.2 Osservazioni

Terminato lo studio a temperatura ambiente per la seguente tipologia di materiali, risulta possibile effettuare una serie di considerazioni. Prima di tutto la scelta di durate di impulso contenute risulta necessaria per rispettare i vincoli imposti dalla normativa. Per quanto concerne invece il valore medio conducibilità termica ottenuto sperimentalmente, esso è molto simile al valore presente in [20]. Ciò sottolinea ancora una volta la validità e soprattutto la solidità del metodo termografico. Così come è già stato analizzato nel capitolo precedente, gli andamenti sperimentali presentano un picco iniziale in corrispondenza del transitorio di riscaldamento. Come descritto in [17] esso può essere dovuto alla luce trasmessa e/o diffusa dall'impulso laser e/o al rumore indotto elettricamente associato alla scarica dell'impulso laser. Dal punto di vista delle proprietà chimiche, l'azienda produttrice non fornisce numerose informazioni, tuttavia è evidente che la superficie di questi campioni risulta non porosa e soprattutto liscia. Quest'ultima condizione risulta non favorevole, poiché non permette allo spray opacizzante una completa adesione sulla superficie del campione stesso. Nonostante tale condizione si è riusciti comunque a svolgere le prove a temperatura ambiente registrando in modo adeguato gli andamenti sperimentali.

7.2 Guaina campione 1

Completato lo studio del primo materiale in PVC, si prosegue con l'indagine del secondo materiale disponibile, ossia la guaina campione 1. Essa è riportata in Figura 70:



Figura 69: Materiale Guaina Campione 1

A differenza di quanto visto per il PVC BB flessibile, il seguente materiale ha un struttura tubolare. A partite dal materiale, è possibile ricavare il campione che sarà sottoposto ad analisi a temperatura ambiente.

7.2.1 Studio a temperatura ambiente

Prima di svolgere le prove sul seguente materiale, risulta opportuno annerire la superficie. In Figure 70 e 71 sono raffigurati il campione di partenza e quello opacizzato:

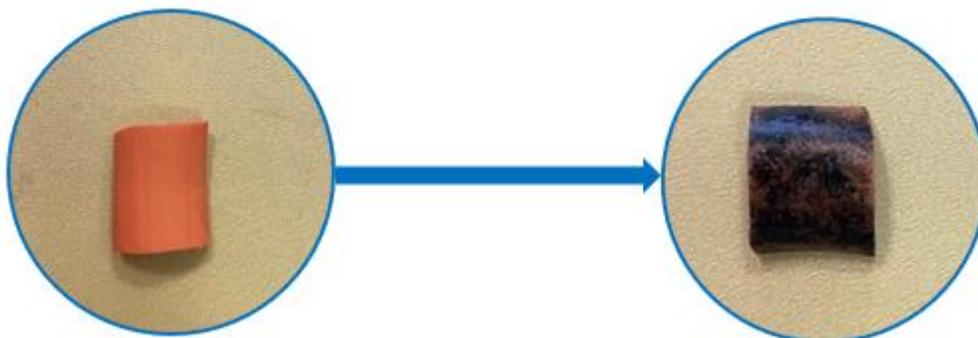


Figura 70: Campione Guaina campione 1 14,3x14,52x1,65 mm vista anteriore

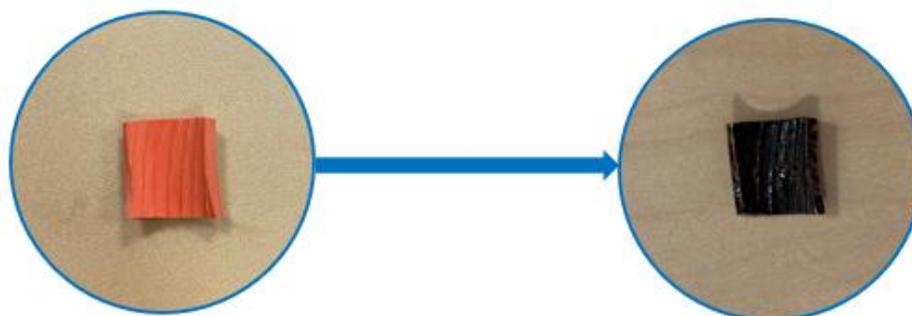


Figura 71: Campione Guaina campione 1 14,3x14,52x1,65 mm vista posteriore

Prima di eseguire i vari test si configura la termocamera, i cui parametri sono riportati, in Tabella 24:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 24: Parametri della termocamera Guaina campione 1

Dato che lo spessore di tali materiali è molto ridotto, ossia 1,65 mm, risulta conveniente indagare il campione con delle durate di impulso consone come 5 e 10ms.

In Tabella 25 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione Guaina campione 1:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	40	0,38	2,5	2,12	10	21,2	47,17	OK	OK
2	60	0,34	2,53	2,19	10	21,9	45,66	OK	OK
3	80	0,37	2,78	2,41	10	24,1	41,49	OK	OK
4	40	0,31	2,35	2,04	5	20,4	49,01	OK	OK
5	60	0,38	2,66	2,28	5	22,8	43,85	OK	OK
6	80	0,3	2,41	2,11	5	21,1	47,39	OK	OK

Tabella 25: Dati campione Guaina campione1

Le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 72 e 73:

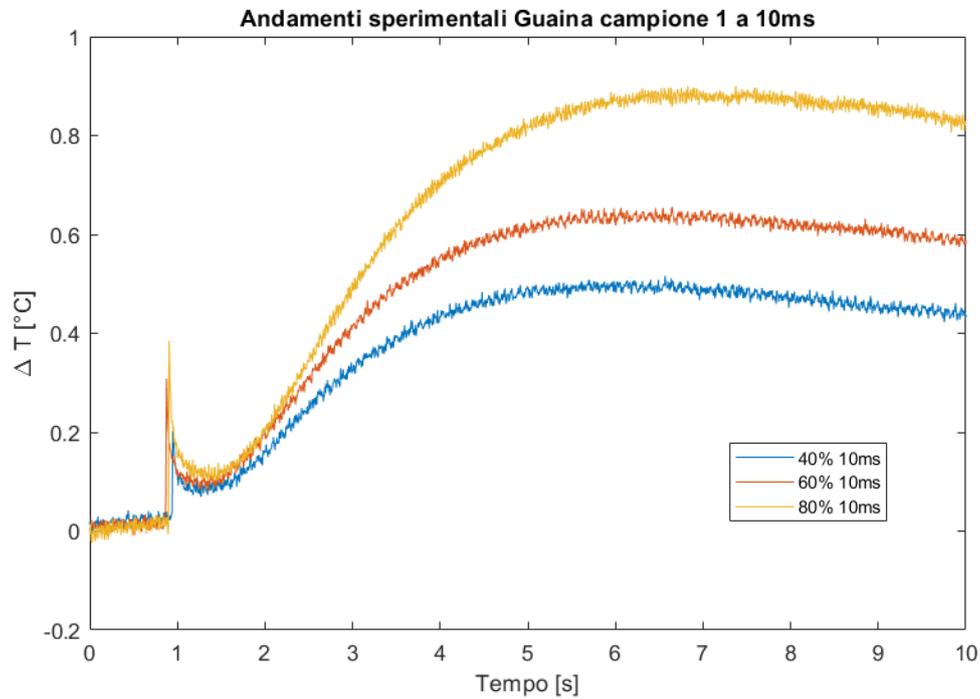


Figura 72: Andamenti di temperatura relativa per il campione Guaina campione 1 10ms

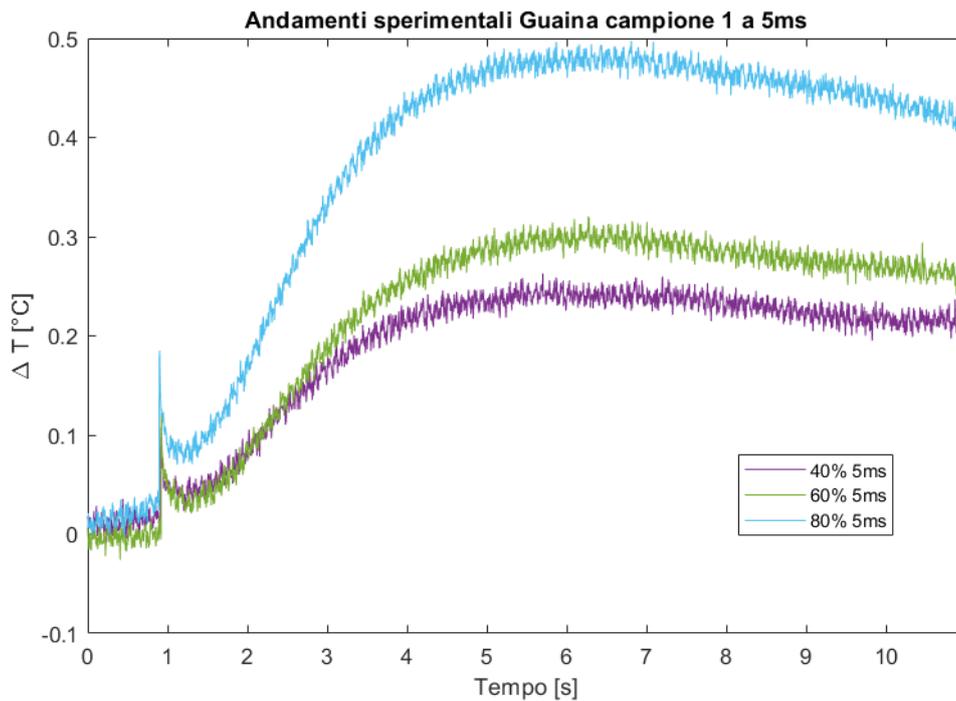


Figura 73: Andamenti di temperatura relativa per il campione Guaina campione 1 5ms

Osservando da un lato gli andamenti sperimentali e dall'altro i risultati tabellati, emerge il fatto che entrambe le condizioni, sia sulla durata dell'impulso sia sulla frame rate, sono rispettate. Dunque, è possibile calcolare sia la diffusività termica che la conducibilità. Il valore di calore specifico utilizzato è lo stesso già introdotto per il PVC BB flessibile. Per quanto concerne invece il valore di densità, si è utilizzato un calibro digitale ed una bilancia digitale estremamente sensibile. In Tabella 26 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova	c_p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,78E-07	0,306
2	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,73E-07	0,297
3	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,57E-07	0,269
4	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,85E-07	0,318
5	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,66E-07	0,285
6	1600	3,68E-04	3,43E-07	1074,1	1,79E-07	0,308

Tabella 26: Proprietà termiche Guaina campione 1

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per la Guaina:

$$\lambda_{Guaina\ campione\ 1\ medio} = 0,297 \frac{W}{mK}$$

Esistono poche indicazioni in letteratura sui valori di conducibilità termica per i seguenti materiali:

CARATTERISTICHE TECNICHE			PVC RIGIDO		
Proprietà	Unità di misura	Metodo	Lastre	Barre	Tubi
MECCANICHE					
Densità	g/cm ³	ISO 1183	1,43	1,40	1,42
Resistenza a trazione	Mpa	DIN EN ISO 527	55	55	≥50
Allungamento a rottura	%	DIN EN ISO 527	21	>18	>15
Modulo di elasticità	Mpa	DIN EN ISO 527	3000	3000	300
Resistenza all'urto	Kj/m ²	DIN EN ISO 179	5,5	4	-
Durezza Shore	Scala D Scala A	ISO 868	81	81	80
TERMICHE					
Punto di fusione	°C		86/90	86/90	86/90
Temperatura d'esercizio	°C		0/+60°C	0/+60°C	0/+60°C
Coefficiente dilatazione lineare	K ⁻¹	DIN 53752	0,8x10 ⁻⁴	0,8x10 ⁻⁴	0,8x10 ⁻⁴
Conducibilità termica	W/m*K	DIN 52612	0,2	0,14	0,15

Figura 74: Conducibilità termica simile a Guaina campione 1

7.2.2 Osservazioni

Analizzando i risultati ottenuti per la seguente tipologia di materiali in PVC emergono diversi aspetti non trascurabili. La scelta di riportare gli andamenti su due grafici differenti è giustificata dal fatto che il materiale indagato non essendo in alcun modo poroso, ma al contrario estremamente rigido seppur sottile, non permetterebbe di distinguere i singoli andamenti sperimentali a parità di variazione della potenza laser. Una caratteristica che evidentemente si registra anche in questo caso è rappresentata dal picco iniziale nel transitorio di riscaldamento. Se si focalizza l'attenzione sul valore di conducibilità termica medio ottenuto dalle prove, risulta evidente che confrontato con quello presente in Figura 74 oppure in [20] esso è leggermente maggiore. Ciò può essere collegato alla tipologia di superficie interna che caratterizza la guaina, come visibile in Figura 75:

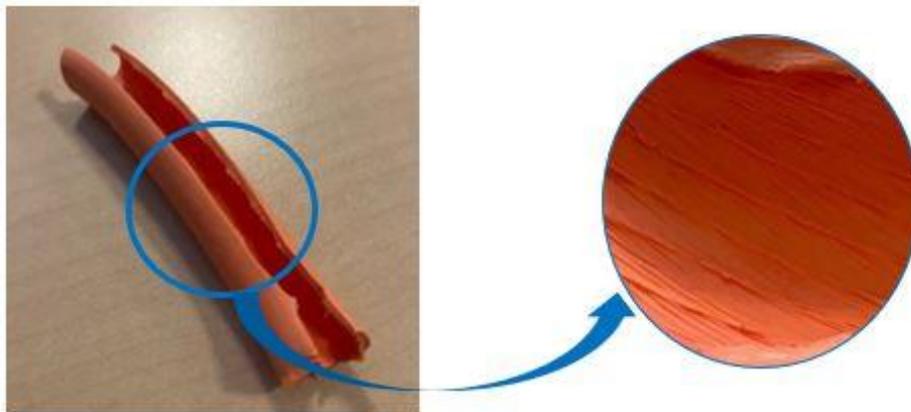


Figura 75: Superficie interna Guaina campione 1

Dalla rappresentazione sopra riportata è possibile osservare che la superficie interna non è liscia come quella esterna, bensì risulta ruvida con una trama zigrinata. Tale condizione incide direttamente sulla conducibilità termica. Dato che la superficie non è liscia ma presenta delle strisce parallele che compongono la trama interna, esse tendono ad aumentare la superficie di scambio termico. Per cui un valore di conducibilità maggiore rispetto a quelli riportati in letteratura è relazionato alla superficie analizzata sperimentalmente. Così come già precedentemente osservato per il PVC BB flessibile, l'operazione di opacizzazione del campione definita grazie ad una bomboletta spray, a causa della superficie liscia della guaina, risulta problematica. Infatti, la superficie anteriore del campione risulta annerita in modo non omogeneo rispetto a quella posteriore. Nonostante tali problemi, si è riusciti ugualmente a raccogliere risultati opportuni dalle prove sperimentali.

7.3 Nastro

Con l'analisi di quest'ultimo materiale, si conclude lo studio sperimentale non solo della famiglia dei materiali in PVC ma di tutti i materiali disponibili forniti da diverse aziende produttrici. Il materiale oggetto di studio è riportato in Figura 76:

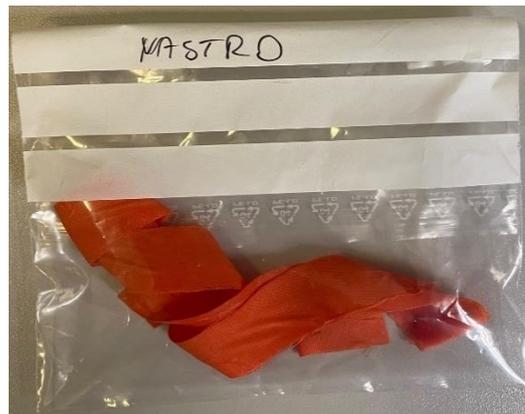


Figura 76: Materiale nastro

A differenza di quanto visto sia per il PVC BB flessibile che per la Guaina, il seguente materiale ha una struttura non rigida. Da quest'ultimo è possibile ricavare il campione che sarà sottoposto ad analisi a temperatura ambiente.

7.3.1 Studio a temperatura ambiente

Prima di svolgere le prove sul seguente materiale, risulta opportuno annerire la superficie. In Figura 76 è raffigurato il campione di partenza e quello opacizzato:

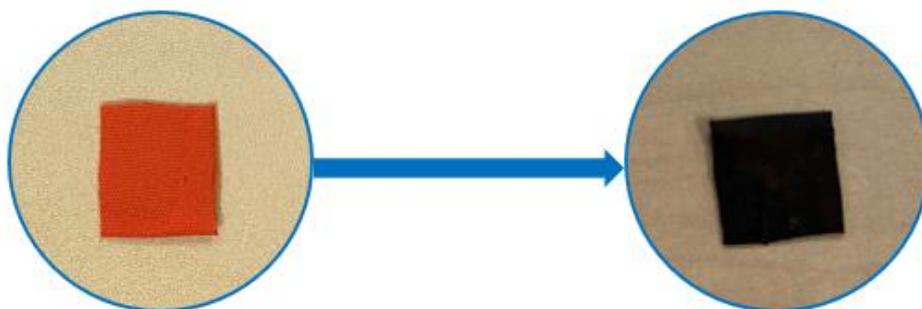


Figura 77: Campione nastro 13,76x14,48x0,54 mm

Il campione di materiale sopra riportato è stato ricavato sovrapponendo due singoli campioni attraverso uno strato adesivo già presente su un lato del Nastro stesso. In tal modo è possibile effettuare delle prove sperimentali con uno spessore più grande, in modo tale da poter raccogliere dei risultati validi.

Prima di eseguire i vari test si configura la termocamera, i cui parametri sono riportati, in Tabella 27:

Parametri termocamera	Valori
Emissività	0,9
Distanza [m]	0,6
Temperatura riflessa [°C]	26
Temperatura atmosferica [°C]	26
Umidità relativa [%]	30
Trasmissione	0,95
Frame rate [Hz]	477

Tabella 27: Parametri della termocamera del Nastro

Dato che lo spessore del Nastro è molto ridotto, ossia 0,54 mm, risulta conveniente indagare il campione con una durata di impulso consona come 5 ms.

In Tabella 28 si riportano le informazioni relative al set di prove eseguite a temperatura ambiente sul campione Nastro:

Prove	Potenza laser	t_0	$T_{ass1/2}$	$t_{1/2}$	Durata Impulso	$t_{1/2}/100$	$100/t_{1/2}$	C.D.I.	C.F.R.
[-]	[%]	[s]	[s]	[s]	[ms]	[ms]	[Hz]	[-]	[-]
1	11	0,23	0,90	0,75	5	7,5	133,33	OK	OK
2	20	0,28	0,93	0,75	5	7,5	133,33	OK	OK
3	30	0,22	0,94	0,78	5	7,8	128,20	OK	OK
4	40	0,22	0,88	0,76	5	7,6	131,58	OK	OK
5	50	0,28	0,94	0,78	5	7,8	128,20	OK	OK
6	60	0,20	0,94	0,79	5	7,9	126,58	OK	OK

Tabella 28: Dati campione Nastro

Le informazioni circa il valore di $t_{1/2}$ raccolte in tabella, sono ricavabili direttamente dagli andamenti sperimentali raffigurati in Figura 78 di seguito riportata:

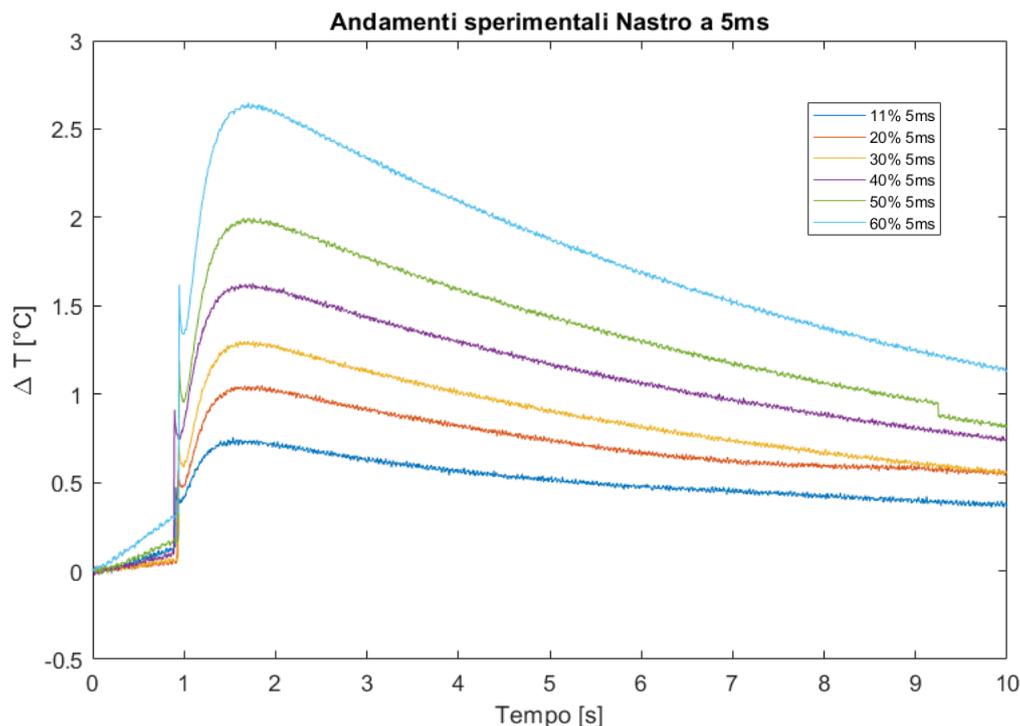


Figura 78: Andamenti di temperatura relativa per il campione Nastro 5ms

Osservando da un lato gli andamenti sperimentali e dall'altro i risultati tabellati, si nota che entrambe le condizioni, sia sulla durata dell'impulso sia sulla frame rate, sono rispettate. Dunque, è possibile calcolare sia la diffusività termica che la conducibilità. Il valore di calore specifico utilizzato è lo stesso già introdotto per il PVC BB flessibile. Per quanto concerne invece il valore di densità, si è utilizzato un calibro digitale ed una bilancia digitale estremamente sensibile. In Tabella 29 sono riportati i valori di diffusività e conducibilità per il set di prove analizzato:

Prova	c_p	Massa	Volume	ρ	α	λ
[-]	[J/kgK]	[kg]	[m ³]	[kg/ m ³]	[m ² /s]	[W/mK]
1	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	6,04E-08	0,092
2	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	6,23E-08	0,094
3	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	5,70E-08	0,086
4	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	6,04E-08	0,092
5	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	6,13E-08	0,093
6	1600	1,02E-04	1,08E-07	948	5,47E-08	0,083

Tabella 29: Proprietà termiche Nastro

È possibile stimare un valore medio di conducibilità per il Nastro:

$$\lambda_{Nastro\ medio} = 0,090 \frac{W}{mK}$$

Esistono poche indicazioni in letteratura sui valori di conducibilità termica specifici per i nastri in PVC, indicativamente si può fare riferimento ai valori riportati in Figura 74.

7.3.2 Osservazioni

Una volta completata l'analisi del seguente materiale, si passano in rassegna diverse considerazioni. Prima di tutto, la scelta di eseguire prove per durate di impulso limitate, è dettata dal fatto che il campione essendo troppo sottile non riesce a trattenere per un determinato intervallo di tempo il calore ceduto dal laser. Per cui se si analizzasse il materiale con durate di impulso superiori, non si riuscirebbero a rispettare i vincoli imposti dalla normativa. Una caratteristica che evidentemente si registra anche in questo, rappresentativa di questa famiglia di materiali, è rappresentata dal picco iniziale nel transitorio di riscaldamento. In ultima analisi il valore medio di conducibilità ottenuto per il Nastro è inferiore a quelli presenti in letteratura. L'indagine sperimentale svolta in particolare per questo materiale non può essere considerata adiabatica a causa dei valori bassi di diffusività termica ottenuta. Per il seguente motivo, il valore medio di conducibilità calcolato risulta affetto da errori sistematici che determinano una deviazione seppur leggera, ma evidente, dai valori riportati in normativa.

7.4 Confronto tra i campioni

Dopo aver terminato l'indagine sperimentale sui seguenti campioni, può essere interessante focalizzare l'attenzione sul confronto tra i tre diversi materiali. Per quanto riguarda i valori medi di conducibilità ottenuti, si ha:

Provino [-]	λ [W/mK]
PVC BB flessibile	0,226
Guaina campione 1	0,297
Nastro	0,090

Tabella 30: Confronto valori di conducibilità campioni in PVC

I tre valori ottenuti sono abbastanza diversi tra di loro, soprattutto se confrontati con la conducibilità del Nastro. Anche se realizzati con lo stesso materiale sono presenti evidenti differenze in termini di struttura, tali da determinare un diverso comportamento in

presenza di un impulso laser. Come già accennato in precedenza, tutti e tre i campioni presentano un picco iniziale in corrispondenza del transitorio di salita; tale caratteristica è rappresentativa della seguente famiglia di materiali e prescinde dalla struttura costitutiva dei tre campioni indagati. In ultima analisi, si riportano nuovamente in Figura 79, le indicazioni circa le proprietà termiche valevoli per i seguenti materiali, mettendo in evidenza la temperatura massima di esercizio:

PROPRIETA' TERMICHE			
Temperatura minima di utilizzo	C°	EN 1876	-15
Temperatura massima di utilizzo	C°	EN 1876	50
Colore specifico	Kj / kg K	ISO 11357	1,6

TERMICHE					
Punto di fusione	°C		86/90	86/90	86/90
Temperatura d'esercizio	°C		0/+60°C	0/+60°C	0/+60°C
Coefficiente dilatazione lineare	K ⁻¹	DIN 53752	0,8x10 ⁻⁴	0,8x10 ⁻⁴	0,8x10 ⁻⁴
Conducibilità termica	W/m*K	DIN 52612	0,2	0,14	0,15

Figura 79: Temperature massime campioni in PVC

Dalla figura sopra riportata è chiaro che i seguenti materiali hanno un range di temperatura di esercizio evidentemente limitato. Essendo il limite superiore pari a 60°C lo studio in temperatura potrebbe rivelarsi inconcludente. Si supponga di impostare il forno a Muffola ad un temperatura target di 60°C e di lasciare i campioni per una durata consona al loro spessore. Una volta prelevati insieme al porta campione, con un guanto di materiale isolante, e sottoposti ad un'indagine di termografia pulsata emerge un problema: lo scambio termico tra il campione e l'ambiente circostante nel passaggio dal forno alla prova in sé, è tale che non appena parte la registrazione della termocamera i valori di ΔT evidenziati sono estremamente bassi. Il campione tende naturalmente a ridurre il proprio contenuto termico, per cui non potendo eseguire una prova termografica non appena il campione viene prelevato dal forno, lo studio in temperatura risulta infruttuoso. Qualora fosse possibile studiare i seguenti campioni a valori di temperatura maggiori rispetto a quella ambiente, sarebbe interessante capire come varia la conducibilità nel range di esercizio valido.

Capitolo 8

Modello termografico

Dopo aver introdotto le basi circa lo studio della Termografia, può essere interessante individuare un modello che consenta di ottenere degli andamenti di temperatura ipotizzando di modellare delle prove di termografia attiva. Negli ultimi anni sono stati sviluppati numerosi modelli, sia analitici che numerici, in grado di approssimare prove sperimentali ottenute con la tecnica termografica. La distinzione tra i due approcci è la seguente:

- *Metodo analitico*: si risolvono in maniera analitica le equazioni differenziali che descrivono il problema di interesse. Alcuni risultati interessanti sono riportati in [21] e [22];
- *Metodo numerico*: si approssimano le derivate e gli integrali con dei piccoli rapporti incrementali che si risolvono matematicamente tramite un computer. In letteratura esistono numerosi casi di studio che si basano sul seguente approccio. Alcuni risultati interessanti sono proposti in [23], [24] e [25].

Nel seguente capitolo sarà proposto un metodo semi-analitico che prevede in principio la costruzione di un modello definito grazie all'analogia elettrica tipica dei problemi termodinamici, ed in fine l'identificazione empirica di una funzione specifica: il calore assorbito dalla superficie del campione analizzato. Tali strumenti permetteranno di costruire un modello interessante con l'ausilio di diversi coefficienti, di cui si studierà evidentemente l'influenza.

8.1 Valutazione termodinamica

Il primo passo da seguire per la costruzione del modello termografico consiste nell'inquadrare il problema attraverso l'analogia tra elementi elettrici e processi di scambio di calore. Ciò deriva dal fatto che la tecnica termografica prevede un contrasto termico in corrispondenza della superficie del campione analizzato. In particolar modo, nel momento in cui il laser incide sulla superficie anteriore del campione stesso, si genera uno scambio di calore non trascurabile. Nel seguente caso di studio, si fa riferimento a due possibili meccanismi di scambio termico: per conduzione e per convezione.

8.1.1 Scambio termico per conduzione

La conduzione termica si manifesta come scambio di energia termica all'interno di corpi o tra corpi solidi, liquidi o gassosi, in contatto tra di loro, senza movimento di materia. Lo scambio termico è dovuto alla cessione di energia cinetica molecolare (rotazionale e vibrazionale) da zone ad alta temperatura verso zone adiacenti a più bassa temperatura. Tale processo è regolato dall'equazione di Fourier:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (8.1)$$

Dove:

- λ conducibilità termica $\left[\frac{W}{mK}\right]$;
- A sezione $[m^2]$;
- \dot{Q} flusso di potenza termica $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

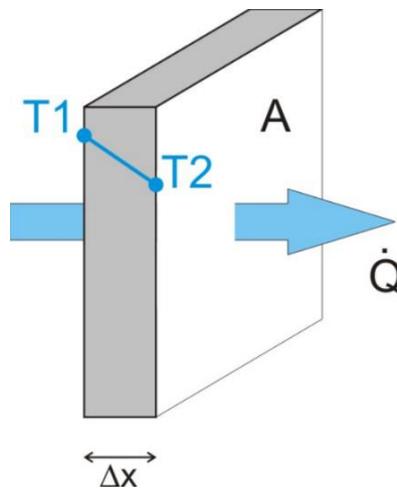


Figura 80: Scambio termico per conduzione

8.1.2 Scambio termico per convezione

La convezione termica prevede che almeno uno dei due corpi che si scambiano calore è un fluido (in moto relativo rispetto all'altro corpo con cui scambia calore). Il moto del fluido può avere cause differenti, per cui si parla di:

- Convezione naturale;
- Convezione forzata.

Tale processo è regolato dalla relazione di Newton:

$$\dot{Q} = h \cdot \Delta T \quad (8.2)$$

Dove h è il coefficiente di scambio per convezione $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$.

Il valore utilizzato per aria ferma è pari: $h_{aria\ ferma} = 3 \left[\frac{W}{m^2K}\right]$.

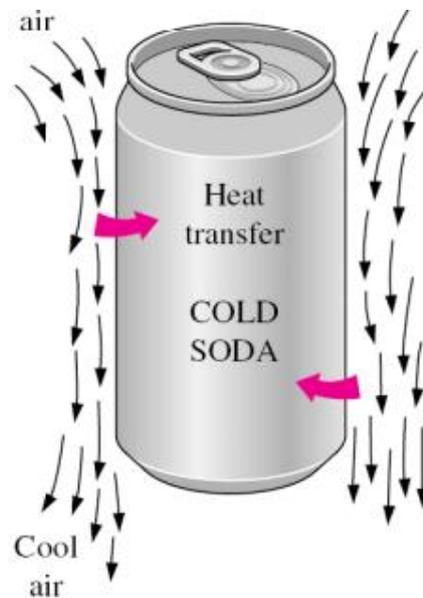


Figura 81: Scambio termico per convezione

8.2 Indagine del modello

Dopo aver introdotto i due meccanismi di scambio termico presenti nel problema analizzato, si procede con l'analisi concreta del modello. In particolar modo è proposto prima il modello equivalente a cui si farà riferimento, focalizzando l'attenzione sulle ipotesi da adottare per ottenere risultati adeguati. In un secondo momento si introdurrà il modello effettivo che meglio approssima il caso di studio. Tali ingredienti risultano indispensabili per gettare le basi del modello che progressivamente sarà costruito.

8.2.1 Modello equivalente

Come già precedentemente accennato, risulta necessario partire dalla descrizione del modello equivalente in modo tale da inquadrare in modo opportuno il caso di studio. Trattandosi di un modello, di seguito si riportano le ipotesi considerate:

- Il mezzo attraverso il quale avviene la conduzione deve essere:
 - Continuo: in ogni punto ha le stesse caratteristiche chimico-fisiche;
 - Isotropo: ha lo stesso comportamento in ogni direzione;
 - Omogeneo: è composto da una sola sostanza.
- Il flusso considerato è unidirezionale.

Definite le ipotesi alla base del modello, in Figura 82 è riportato uno schema semplificato del modello equivalente:

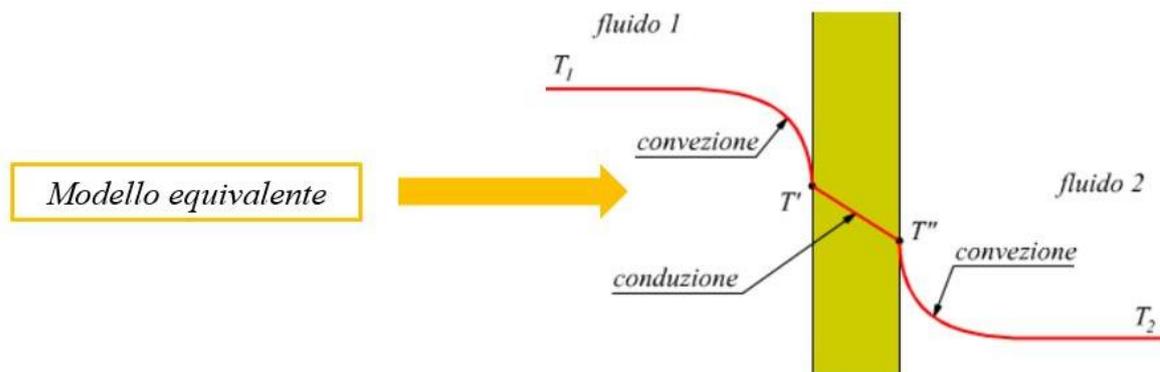


Figura 82: Schema del modello equivalente

Analizzando la schematizzazione del modello equivalente emerge che le uniche due tipologie di scambio termico presenti, sono conduzione e convezione. Il corpo giallo non è altro che il campione di materiale sottoposto ad una prova di termografia attiva. Evidentemente sulla superficie di quest'ultimo incide il fascio laser, il quale determinerà un contrasto termico tra la superficie anteriore e la superficie posteriore. Per quanto concerne invece il fluido 1 e 2 presenti nello schema, non sono altro che l'aria ferma circostante. Dunque, il modello equivalente presenta due scambi convettivi tra l'aria e le due superfici del campione ed uno scambio conduttivo in corrispondenza dello spessore del campione stesso sottoposto al fascio laser. Tali informazioni rappresentano il punto di inizio della descrizione del modello effettivo, il quale si contornerà di possibili accorgimenti per descrivere in modo ancor più veritiero le prove sperimentali svolte in laboratorio.

8.2.2 Modello effettivo

Terminata la descrizione del modello equivalente, si procede con l'identificazione del modello effettivo che riproduce in modo evidentemente semplificato il caso oggetto di studio. In Figura 83 è riportato lo schema del modello effettivo:

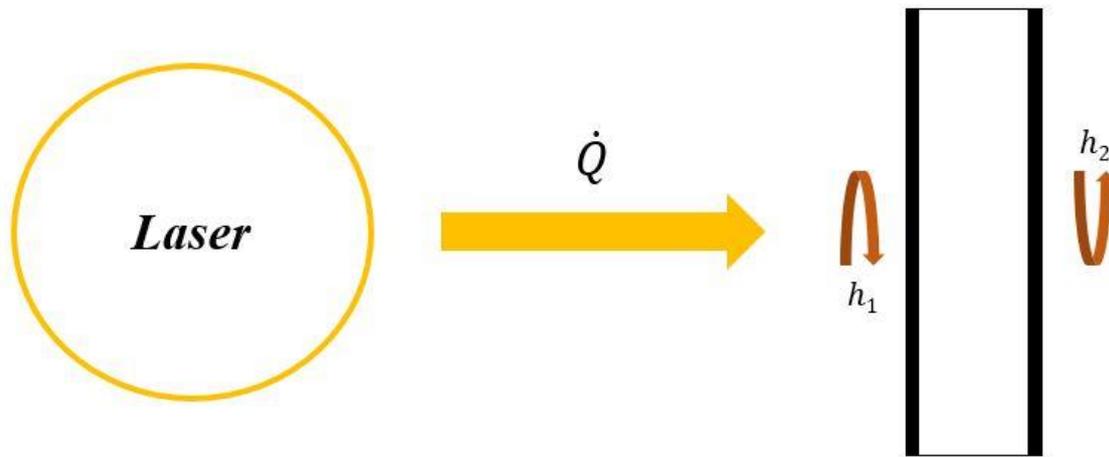


Figura 83: Schema del modello effettivo

A partire dal laser, che determina il fascio che incide sulla superficie del campione, si determina una funzione \dot{Q} che definisce il flusso di potenza termica assorbito dalla superficie del campione stesso. Dato che per aumentare la capacità di assorbimento dell'informazione laser la maggior parte dei campioni è stata opportunamente annerita, in Figura 83 sono stati introdotti alle estremità due strati di materiale nero applicati sul provino. Mentre per quanto riguarda il coefficiente di scambio convettivo, esso è lo stesso sia in corrispondenza della superficie anteriore, sia sulla superficie posteriore: $h_{aria\ ferma} = h_1 = h_2$.

8.3 Analogia elettrica

Terminata la descrizione del modello effettivo, si prosegue con la definizione di uno strumento estremamente interessante per lo studio di problemi in ambito termodinamico: l'analogia elettrica. Essa si fonda evidentemente sull'applicazione della legge di Ohm, una legge di causa-effetto. La differenza di temperatura (causa) provoca un flusso di calore (effetto), così come la differenza di potenziale fa circolare corrente elettrica. In

Figura 84 è riportato uno schema che permette di comprendere meglio il seguente approccio:

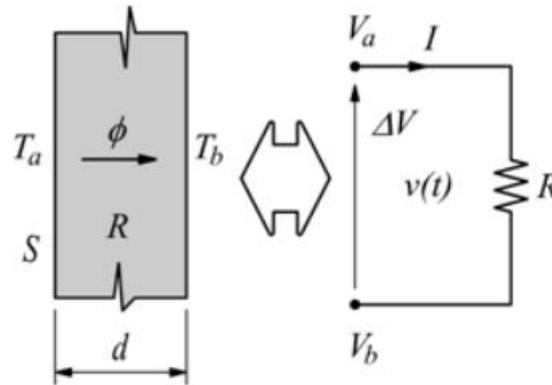


Figura 84: Schema dell'analogia elettrica

8.3.1 Modello con resistenze

Nel caso di studio sono presenti due tipologie di resistenze $\left[\frac{\text{Km}^2}{\text{W}}\right]$ dove s è lo spessore del materiale analizzato:

- $R_{\text{conduttiva}} = \frac{s}{\lambda}$;
- $R_{\text{convettiva}} = \frac{1}{h}$.

Per costruire l'equivalente elettrico si riportano le resistenze integrate nel modello:

- $R_{\text{convettiva},1} = \frac{1}{h_1}$: tra l'aria e il primo strato annerito sulla faccia anteriore del provino;
- $R_{\text{conduttiva},1} = \frac{s_1}{\lambda_1}$: nel passaggio in corrispondenza del primo strato annerito;
- $R_{\text{conduttiva},2} = \frac{s_2}{\lambda_2}$: nel passaggio in corrispondenza del campione di materiale analizzato;
- $R_{\text{conduttiva},3} = \frac{s_3}{\lambda_3}$: nel passaggio in corrispondenza del secondo strato annerito;
- $R_{\text{convettiva},2} = \frac{1}{h_2}$: tra l'aria e il secondo strato annerito sulla faccia anteriore del provino.

Per cui il modello effettivo può essere descritto con l'equivalente elettrico nel modo seguente:

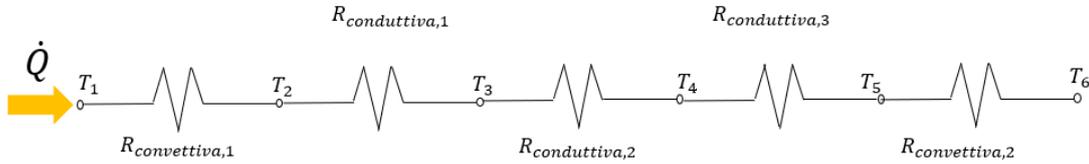


Figura 85: Analogia elettrica applicata al caso di studio

In Figura 85 è proposto uno schema estremamente interessante che consente di capire la sequenzialità delle resistenze previste dal modello .

8.3.2 Andamento di temperatura

Dopo aver definito le resistenze attraverso l'analogia elettrica, è possibile valutare la resistenza equivalente:

$$R_{eq} = \frac{1}{h_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_2} \quad (8.3)$$

Da cui:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{eq}} = \frac{T_{finale} - T_{iniziale}}{R_{eq}} \quad (8.4)$$

Dalla relazione precedente è possibile definire la funzione che descrive l'andamento di temperatura voluto:

$$T_{finale} = T_{iniziale} + \dot{Q} \cdot R_{eq} \quad (8.5)$$

Dove \dot{Q} che descrive il flusso di potenza termica assorbito dalla superficie del campione analizzato.

8.4 Funzione \dot{Q}

Identificata la funzione che descrive l'andamento di temperatura del materiale analizzato in presenza di un impulso, è necessario definire la \dot{Q} .

Si considerano *due possibili soluzioni* da seguire:

1. Eguagliare l'equazione precedentemente trovata con la soluzione unidimensionale dell'equazione di Fourier per una funzione delta di Dirac descritta nella sezione della termografia pulsata (2.6);
2. Identificare la funzione \dot{Q} in modo empirico con la successiva definizione di coefficienti.

Nei paragrafi successivi saranno analizzate entrambe le soluzioni, mettendo in evidenza quale tra le due strade risulta effettivamente percorribile.

8.4.1 Prima soluzione

Come già precedentemente accennato, si procede con l'eguagliare le 2 espressioni:

$$\underbrace{T_0 + \dot{Q} \cdot R_{eq}}_{\text{Relazione derivante da analogia elettrica}} = \underbrace{T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p t}} e^{-\frac{z}{4at}}}_{\text{Soluzione unidimensionale dell'equazione di Fourier per una funzione delta di Dirac}} \quad (8.6)$$

Dove:

- z è la distanza lungo la direzione del campione di materiale [m];
- t è la variabile tempo [s].

Dopodiché:

$$\cancel{T_0 + \dot{Q} \cdot R_{eq}} = \cancel{T_0} + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p t}} e^{-\frac{z^2}{4at}} \quad (8.7)$$

Dovendo studiare il comportamento dal punto di vista termico in corrispondenza dello spessore del campione analizzato, è possibile sostituire al posto della variabile z lo spessore d del provino analizzato.

Proseguendo si ottiene:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p t}} e^{\left(-\frac{d^2}{4\alpha t}\right)} \cdot \frac{1}{R_{eq}} \quad (8.8)$$

A questo punto si ottiene l'equazione differenziale di interesse:

$$\dot{Q} - \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p t}} e^{\left(-\frac{d^2}{4\alpha t}\right)} \cdot \frac{1}{R_{eq}} = 0 \quad (8.9)$$

Dalla seguente equazione sarebbe interessante trovare una *funzione* $Q(t)$ tale da poter descrivere il comportamento relativo al calore assorbito dalla superficie del campione in condizioni di PT. Il problema di questa prima strada è legato al fatto che la soluzione della seguente equazione differenziale non si può calcolare, dato che la relazione (2.6) non ha una forma chiusa.

8.4.2 Seconda soluzione

A differenza della prima soluzione, in questo caso si cerca di identificare una funzione $Q(t)$ in modo empirico partendo delle curve ottenute sperimentalmente su campioni di materiale specifico.

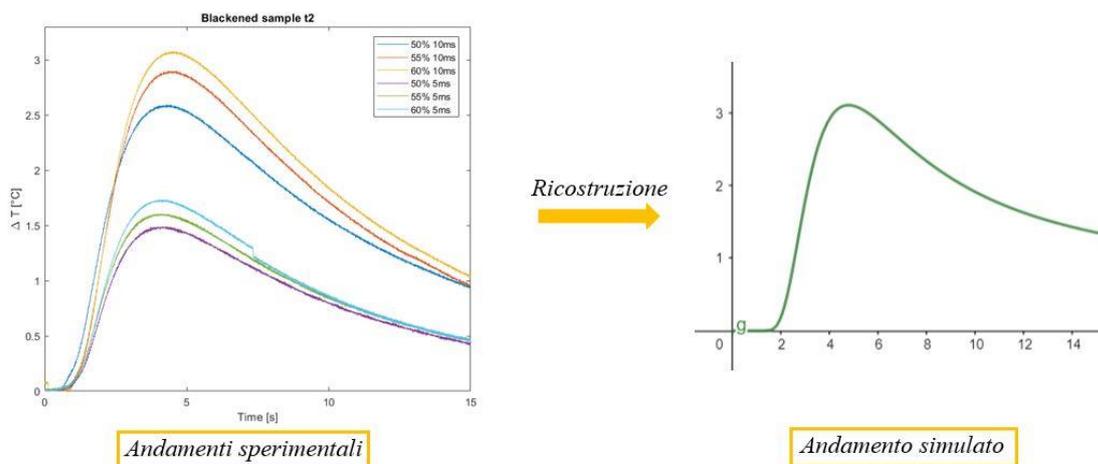


Figura 86: Applicazione della seconda soluzione

Dato che la prima soluzione non può essere seguita, si svilupperà nei paragrafi successivi la seconda soluzione, partendo proprio dall'identificazione empirica di una funzione $Q(t)$.

8.4.3 Forma funzionale $Q(t)$

La forma funzionale scelta è la seguente:

$$Q(t) = f(x) = \varphi \cdot e^{\frac{2 \cdot \gamma \sqrt{x}}{\eta \cdot \delta}} \longrightarrow \text{Calore assorbito dalla superficie} \quad (8.10)$$

$$\dot{Q}(t) = g(x) = f'(x) \longrightarrow \text{Flusso di potenza termica assorbito dalla superficie} \quad (8.11)$$

In tal modo è stata definita la funzione $\dot{Q}(t)$ necessaria per risolvere la relazione (8.5) in modo analitico.

La funzione identificata in modo empirico deriva da un'assunzione interessante, ossia considerare nella relazione (8.9) la variabile tempo presente in corrispondenza della funzione esponenziale come una costante. Partendo da quest'ultima relazione è possibile semplificare la formulazione introducendo due variabili:

$$\varepsilon = k \cdot \rho \cdot c_p \cdot \pi \quad (8.12)$$

$$\delta = \frac{d^2}{4 \cdot \alpha} \quad (8.13)$$

In questo modo è possibile riscrivere l'equazione precedente nel seguente modo:

$$\dot{Q} - \frac{Q}{\sqrt{\varepsilon t}} e^{\left(\frac{-\delta}{t}\right)} \cdot \frac{1}{R_{eq}} = 0 \quad (8.14)$$

\downarrow
Variabile

\downarrow
Costante

A questo punto è possibile risolvere l'equazione differenziale, distinguendo la variabile t con x :

$$\dot{Q} - \frac{Q}{\sqrt{\varepsilon x} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}} \cdot \frac{1}{R_{eq}} = 0 \quad (8.15)$$

Da cui considerando $\dot{Q} = \frac{dQ}{dx}$ si ottiene:

$$\frac{dQ}{dx} - \frac{Q}{\sqrt{\varepsilon x} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}} \cdot \frac{1}{R_{eq}} = 0 \quad (8.16)$$

Manipolando opportunamente l'equazione precedente, si ottiene:

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dx}{\sqrt{\varepsilon x} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}} \cdot \frac{1}{R_{eq}} \quad (8.17)$$

Dopodiché si procede con l'integrazione per variabili separabili:

$$\int \frac{dQ}{Q} = \int \frac{dx}{\sqrt{\varepsilon x} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}} \cdot \frac{1}{R_{eq}} \quad (8.18)$$

Calcolando gli integrali risultanti si ottiene:

$$\ln Q = \frac{2\sqrt{\varepsilon x}}{\varepsilon R_{eq} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}} + C \quad (8.19)$$

A tal punto è possibile ottenere la soluzione sfruttando le proprietà degli esponenziali:

$$Q = C e^{\frac{2\sqrt{\varepsilon x}}{\varepsilon R_{eq} e^{\left(\frac{\delta}{t}\right)}}} \quad (8.20)$$

Partendo dalla seguente formulazione sarà interessante introdurre dei coefficienti e fattori correttivi che permetteranno di ricostruire gli andamenti ottenuti sperimentalmente.

8.4.4 Coefficienti e fattori correttivi

La formulazione (8.20) precedentemente calcolata per poter essere utilizzata in modo tale da ottenere risultati interessanti, deve essere opportunamente modificata. Si sostituisce alla costante t la variabile tempo x , e si introducono dei coefficienti e dei fattori correttivi. Tali accorgimenti, permettono di ottenere la relazione (8.10).

Per quanto concerne i coefficienti, è possibile definire δ , precedentemente introdotto nella relazione (8.13), e σ di seguito definito:

$$\sigma = \sqrt{\varepsilon} \cdot R_{eq} = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c_p \cdot \pi} \cdot R_{eq} \quad (8.21)$$

Come è possibile notare che i coefficienti dipendono da:

- Proprietà termiche del materiale;
- Proprietà fisiche del materiale.
- Proprietà dell'ambiente circostante.

Per cui è possibile definire due funzioni:

$$\sigma = f(\text{Proprietà del materiale}, \text{Proprietà ambiente}) \quad (8.22)$$

$$\delta = f(\text{Proprietà del materiale}) \quad (8.23)$$

Definita la dipendenza di tali coefficienti da specifici parametri, è possibile passare in rassegna l'analisi dei fattori correttivi che influenzano il comportamento delle curve simulate:

- φ : trasla le curve verticalmente modificando la quota del picco;
- η : modifica la posizione del picco della curva influenzando la pendenza del transitorio di riscaldamento;
- γ : modifica l'andamento della discesa ed inoltre influenza la posizione del picco;

In Figura 87 è riportato l'andamento dei tre fattori correttivi:

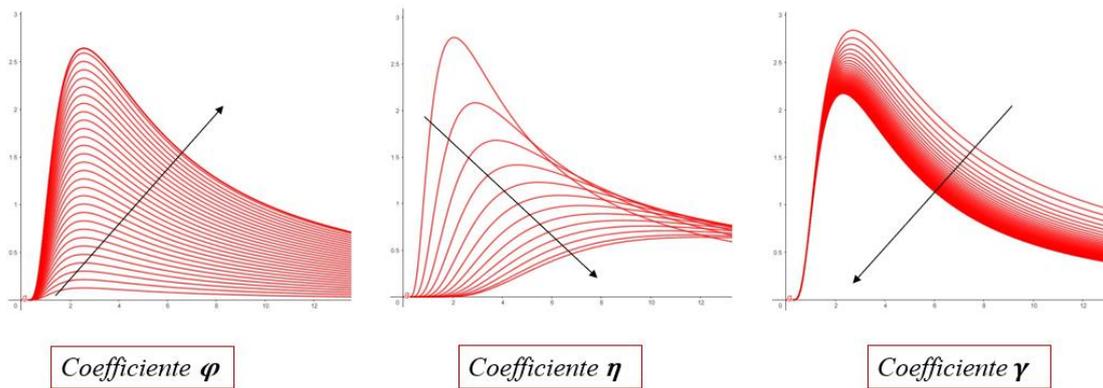


Figura 87: Andamento dei fattori correttivi

Analizzando nel dettaglio l'influenza di tali fattori sulla funzione (8.10) è possibile fare diverse considerazioni:

- Il fattore correttivo φ , per uno specifico campione di materiale analizzato e a parità di durata dell'impulso laser, dipende unicamente della percentuale laser definita per una data prova, per cui è possibile definire la seguente funzione:

$$\varphi = f(\text{Percentuale dell'impulso laser}) \quad (8.24)$$

Inoltre, il seguente fattore tiene già conto del parametro R_{eq} che moltiplica la funzione \dot{Q} in (8.5).

- Il fattore η , per uno specifico campione di materiale analizzato e a parità di percentuale dell'impulso laser, dipende dalla durata dell'impulso definita per una data prova. Inoltre, confrontando due campioni dello stesso materiale, tale fattore è influenzato dallo spessore dei provini stessi. Per cui è possibile definire la seguente funzione:

$$\eta = f(\text{Durata dell'impulso laser}, \text{Spessore provino}) \quad (8.25)$$

- L'ultimo fattore γ influenza in modo significativo il tratto di raffreddamento. Dato che per l'indagine termografica attraverso normativa, il tratto di discesa non risulta significativo in termini di calcoli, il valore di tale fattore correttivo sarà mantenuto costante per tutte le prove che saranno ricostruite. Dalle simulazioni che verranno mostrate successivamente si nota che per garantire l'analisi

dimensionale, di cui si è particolarmente interessati, il suddetto valore è di seguito riportato:

$$\gamma = 1$$

Conclusa l'analisi dei coefficienti e dei fattori correttivi, nei paragrafi successivi si procederà con la ricostruzione delle prove sperimentali.

8.5 Andamenti sperimentali e simulati

Dopo aver analizzato dettagliatamente da un lato la funzione alla base del modello simulato e dall'altro l'importanza dei coefficienti e dei fattori correttivi, si procede con la ricostruzione di alcune prove sperimentali. Considerando la trattazione proposta nei capitoli precedenti focalizzata sull'indagine di ciascuna famiglia di materiali, risulta necessario distinguere due tipologie di andamenti sperimentali:

- *Andamento regolare*: fanno parte di questa famiglia gli Alcen paper Denka e gli ITW Formex. Si tratta sostanzialmente di andamenti puliti che presentano un tratto di salita, associato al tratto di riscaldamento, graduale. Raggiunto il picco si registra un tratto di discesa, associato al tratto di raffreddamento, anch'esso regolare;
- *Andamento con picco iniziale*: fanno parte di questa famiglia gli Stokvis e i Busbar batteries 520-PHEV in PVC. Come è possibile notare dagli andamenti precedentemente ottenuti, è presente un picco iniziale evidentemente dovuto alla luce trasmessa e/o diffusa dall'impulso laser e/o al rumore indotto elettricamente associato alla scarica dell'impulso laser. Raggiunto il picco si registra un tratto di discesa, associato al tratto di raffreddamento, anch'esso regolare.

Distinti i due andamenti, si prosegue con la ricostruzione delle curve sperimentali facendo riferimento a due famiglie prese a titolo di esempio: Alcen paper Denka per quanto concerne gli andamenti regolari e Stokvis per quanto concerne gli andamenti con un picco iniziale.

8.5.1 Ricostruzione prove con andamenti regolari

L'obiettivo della seguente modellazione consiste nel ricostruire le curve ottenute sperimentalmente per una specifica famiglia di materiali: Alcen paper Denka. Prima di procedere con le simulazioni è indispensabile definire R_{eq} , dato che:

$$R_{eq} \sim 0,7 \left[\frac{Km^2}{W} \right] \text{ sia per 2 che 3 mm di spessore}$$

Considerando $h_1 = h_2 = 3 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ trascurando le due resistenze conduttive degli strati anneriti tranne $R_{conduttiva,2}$ dove $s_2 = 2/3mm$ e $\lambda_2 = 0,072$ o $0,0807 \frac{W}{mK}$ rispettivamente per 2 o 3 mm di spessore. (I valori di conducibilità riportati sono medi). Facendo riferimento ai dati sperimentali raccolti per il campione t2, di seguito si riportano i risultati relativi al confronto tra sperimentazione e simulazione:

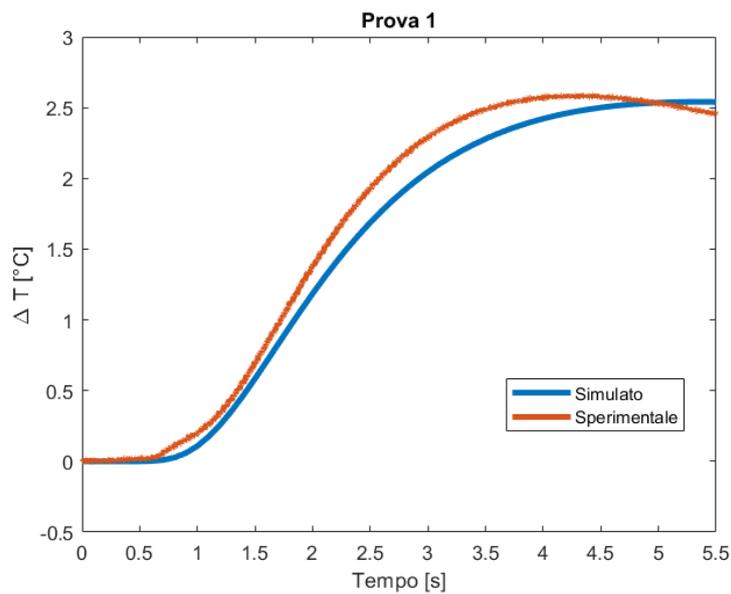


Figura 88: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 t2

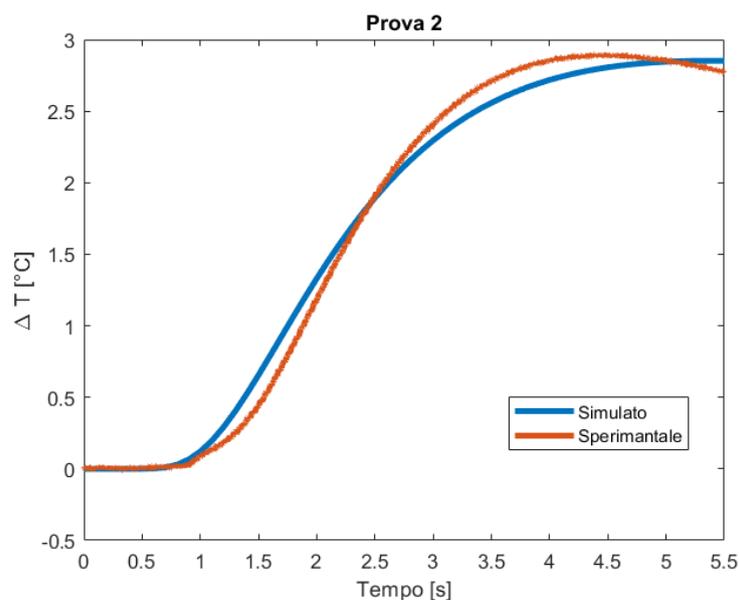


Figura 89: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 2 t2

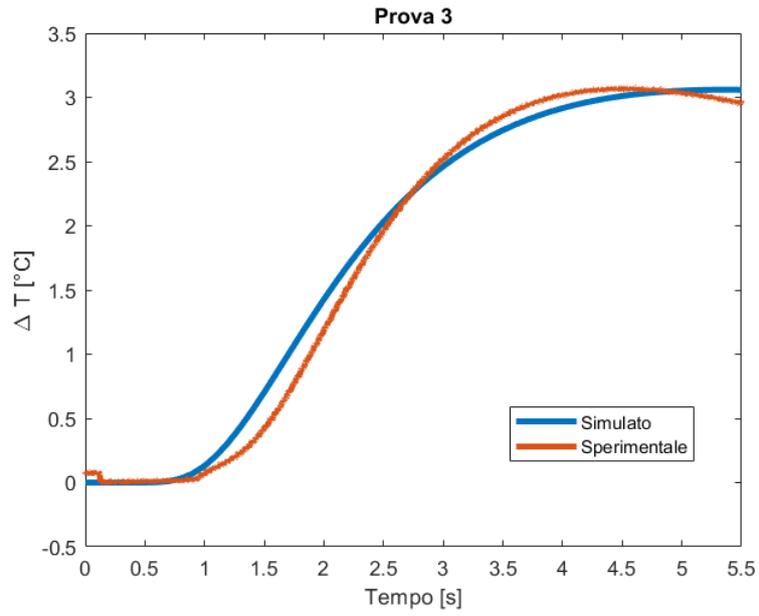


Figura 90: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 3 t2

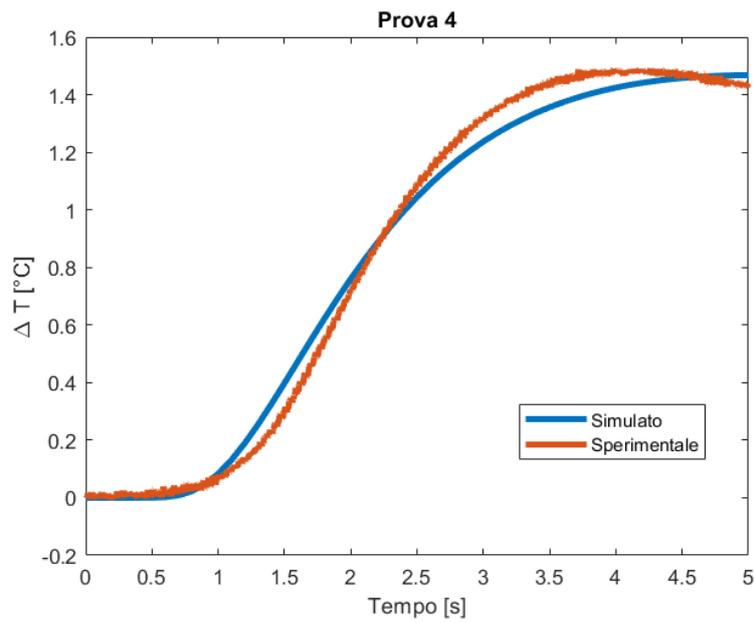


Figura 91: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 4 t2

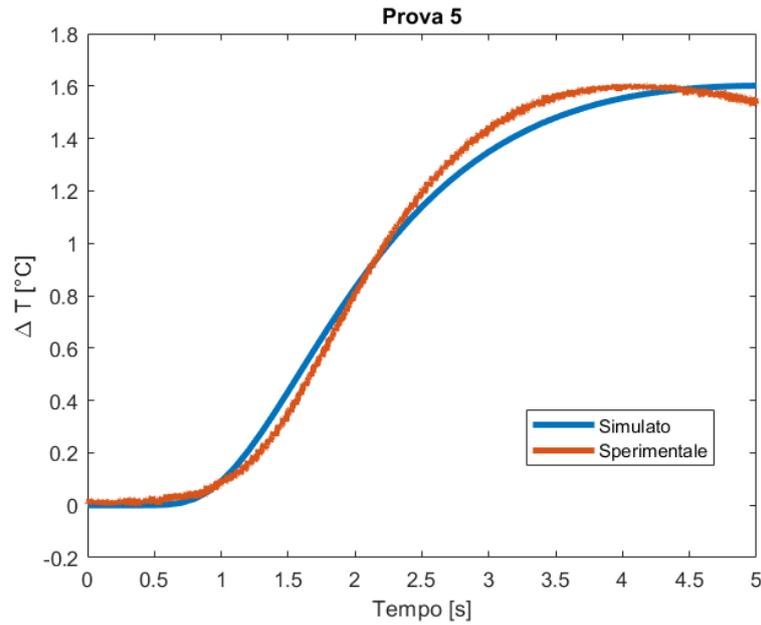


Figura 92: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 5 t2

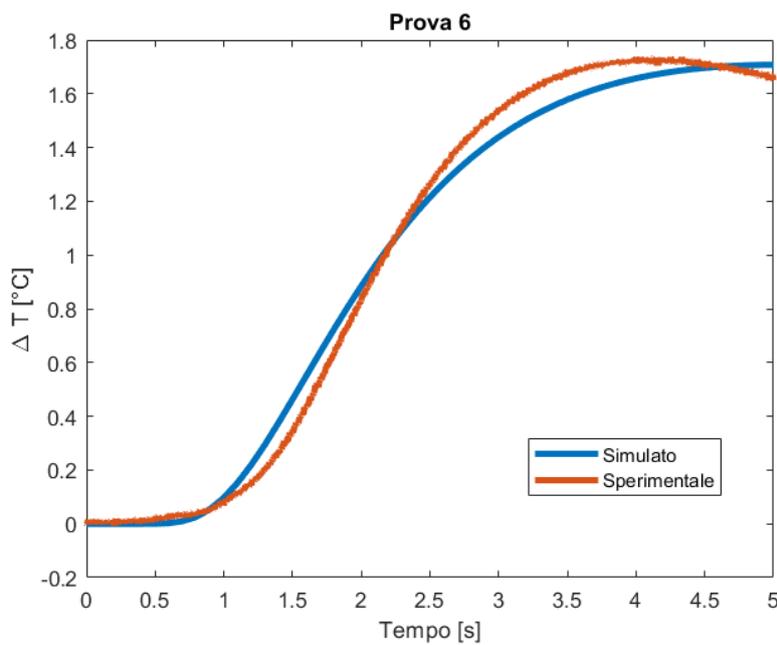


Figura 93: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 6 t2

Dopo aver riprodotto gli andamenti sperimentali con opportune curve afferenti al modello proposto in (8.10), risulta necessario tabellare tutti i fattori correttivi utilizzati per ottenere le seguenti curve.

In tabella 31 sono raccolti i vari fattori:

Prove	Potenza laser	Durata Impulso	σ	δ	φ	η	γ
[-]	[%]	[ms]	[s ^{1/2}]	[s]	[W/ m ²]	[-]	[-]
1	50	10	173,5	2,98	980	2,12	1
2	55	10	173,5	2,98	1110	2,12	1
3	60	10	173,5	2,98	1180	2,12	1
4	50	5	173,5	2,98	550	2	1
5	55	5	173,5	2,98	600	2	1
6	60	5	173,5	2,98	640	2	1

Tabella 31: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione t2

Il lavoro fatto per il campione t2 può essere svolto anche sul campione t3, in modo tale da mettere in evidenza la variazione dei coefficienti e dei fattori correttivi, i quali ricoprono un ruolo determinante nella ricostruzione delle prove ottenute sperimentalmente:

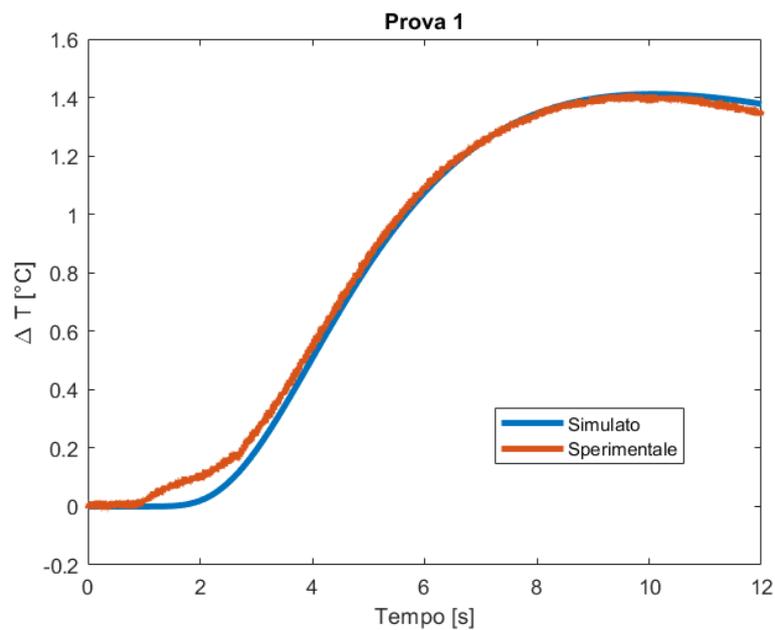


Figura 94: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 t3

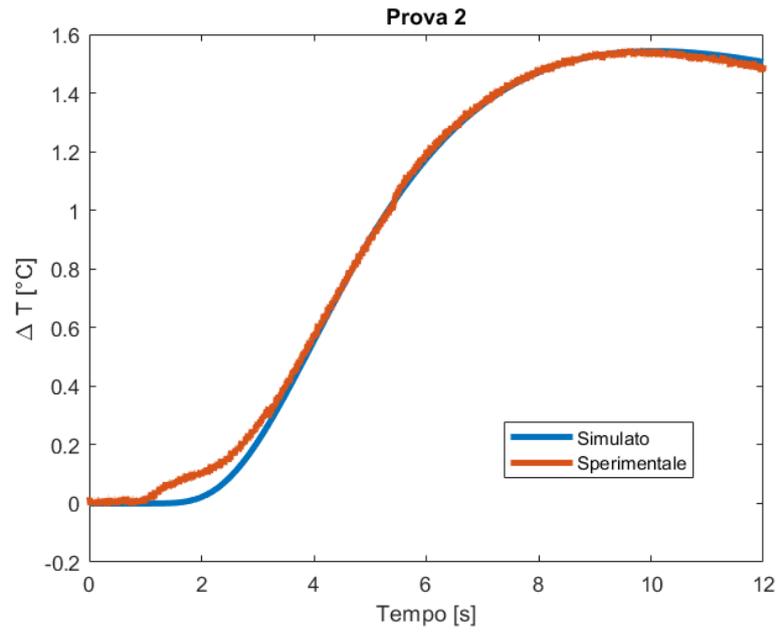


Figura 95: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 2 t3

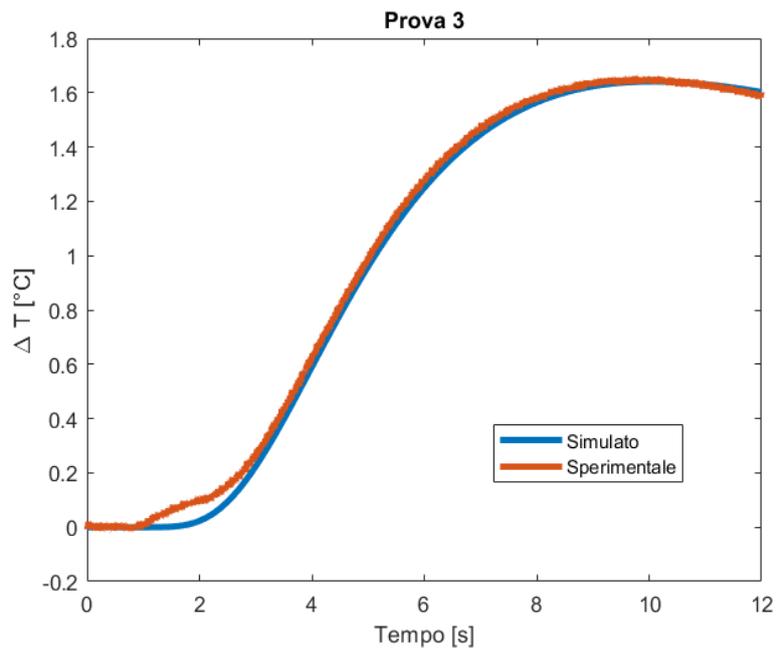


Figura 96: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 3 t3

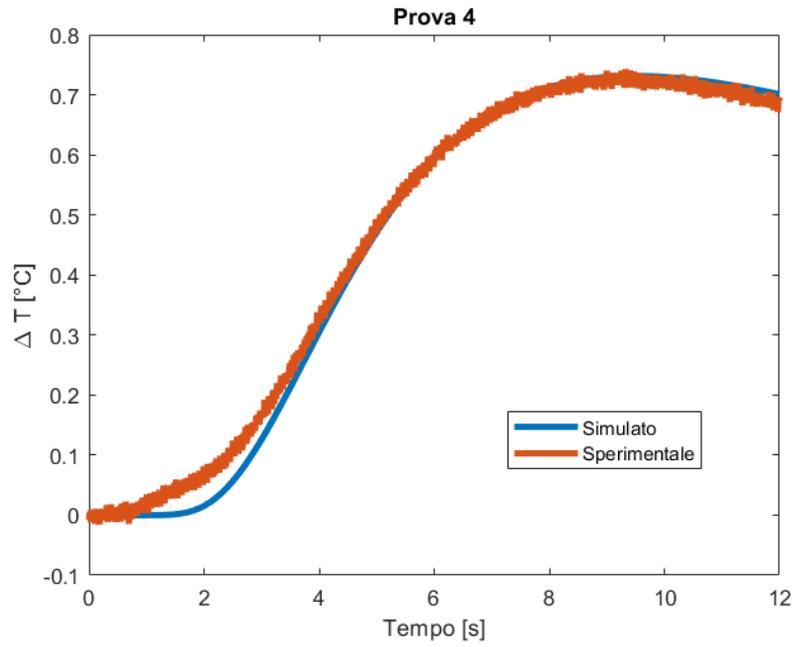


Figura 97: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 4 t3

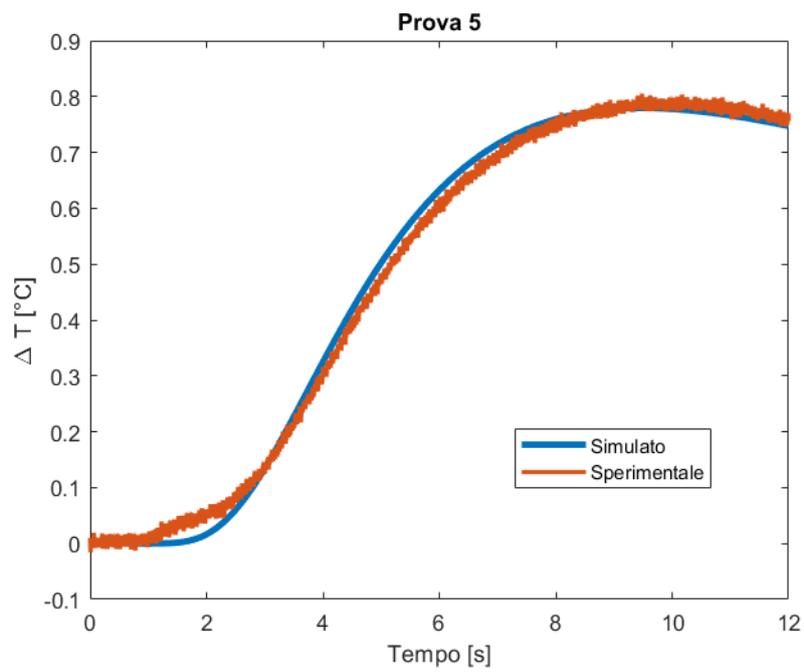


Figura 98: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 5 t3

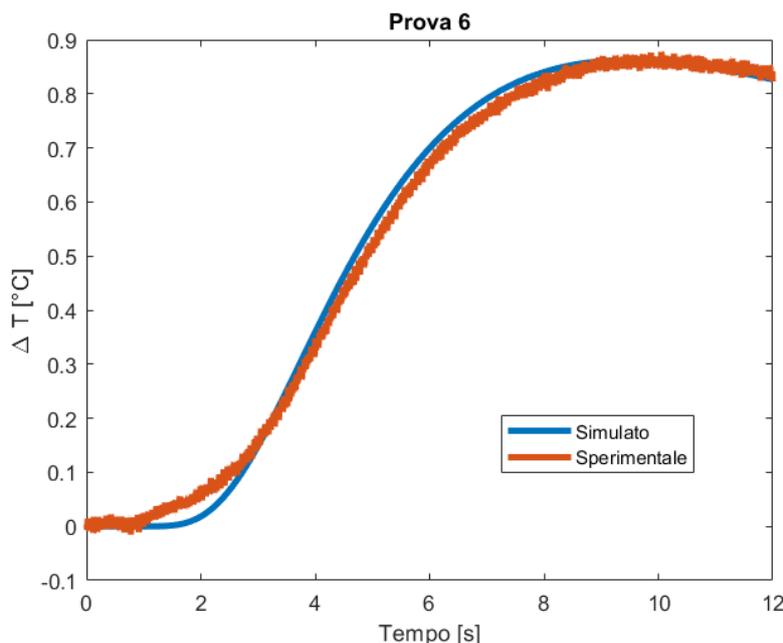


Figura 99: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 6 t3

In tabella 32 sono raccolti i vari fattori:

Prove	Potenza laser	Durata Impulso	σ	δ	φ	η	γ
[-]	[%]	[ms]	[s ^{1/2}]	[s]	[W/ m ²]	[-]	[-]
1	50	20	150	6,7	2150	2,6	1
2	55	20	150	6,7	2300	2,6	1
3	60	20	150	6,7	2500	2,6	1
4	50	10	150	6,7	1060	2,45	1
5	55	10	150	6,7	1130	2,45	1
6	60	10	150	6,7	1250	2,45	1

Tabella 32: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione t3

Osservando gli andamenti ricostruiti attraverso il modello confacente alla relazione (8.10), è possibile notare che le curve simulate si avvicinano a quelle sperimentali. In particolar modo, risulta evidente che per le prove sul campione t2 si registrano dei leggeri sfasamenti sia in corrispondenza della salita che del picco. Per quanto concerne gli andamenti modellizzati per il provino t3, essi si avvicinano in modo evidente agli andamenti sperimentali. Anche in quest’ultimo caso è presente una leggera deviazione tra le due curve in corrispondenza del tratto di salita. Per quanto riguarda i coefficienti e i fattori correttivi, essi sono differenti per i due provini oggetto di studio. In particolar modo, i coefficienti sono diversi a causa del diverso spessore dei due provini considerati; mentre i fattori correttivi seppur diversi presentano una tendenza simile che verrà discussa a fine capitolo.

8.5.2 Ricostruzione prove con picco iniziale

Dopo aver mostrato i risultati per le prove sperimentali con andamento regolare, si procede con la ricostruzione delle prove che presentano un picco iniziale in corrispondenza del tratto iniziale di riscaldamento. La modellizzazione degli andamenti sperimentali può essere ottenuta seguendo due approcci:

- *Funzione a tratti*: tale soluzione di base evidentemente sulla scelta di più funzioni specifiche in grado di ricreare in modo opportuno il tratto di salita con il picco iniziale. Più dettagliatamente, la seguente soluzione prevede l'identificazione di una funzione costante fino al tratto in cui si registra una salita repentina, quasi verticale. Proprio in corrispondenza di tale condizione, sarebbe opportuno scegliere una funzione lineare con pendenza significativa; mentre a valle di quest'ultima si utilizzerebbe il modello (8.10):

$$f(x) = \begin{cases} y = a & 0 < x < t_1/2 \\ x = b & x = t_1/2 \\ y = \varphi \cdot e^{\frac{2 \cdot 2 \cdot \gamma \sqrt{x}}{\eta \cdot \delta}} \cdot \sigma \cdot e^{-x} & x > t_1/2 \end{cases} \quad (8.26)$$

Dove a e b sono costanti opportunamente scelte.

- *Funzione ausiliare*: la seguente soluzione prevede di utilizzare direttamente il modello (8.10), il quale ha lo scopo di una funzione fittizia. Infatti, non essendo in grado di ricostruire la salita con il picco, può essere interessante sostituire la curva sperimentale con una funzione che permetta di ottenere gli stessi risultati che si estrapolerebbero dalla curva di partenza. Per far ciò si utilizzerà a monte il metodo delle aree presentato in [26] e [27], e a valle il modello (8.10).

Sulla base di quanto appena descritto, nelle ricostruzioni che saranno successivamente rappresentate, si è deciso di seguire la seconda strada. In tal modo utilizzando il metodo dell'area sarà possibile ottenere degli andamenti fittizi. Tale metodo consente di analizzare la diffusività termica attraverso materiali multistrati. In particolar modo, una volta normalizzata una curva sperimentale, si procede con la valutazione dell'area sopra al grafico. Il seguente valore è di fondamentale importanza, poiché permette di calcolare proprio la diffusività termica. Sostanzialmente il metodo delle aree è un'alternativa al metodo del tempo di metà riscaldamento, utilizzato nei capitoli precedenti per indagare le proprietà dei materiali oggetto di studio.

Nella Figura 100, è possibile osservare un esempio di curva di incremento temperatura, in condizioni di esercizio ideali:

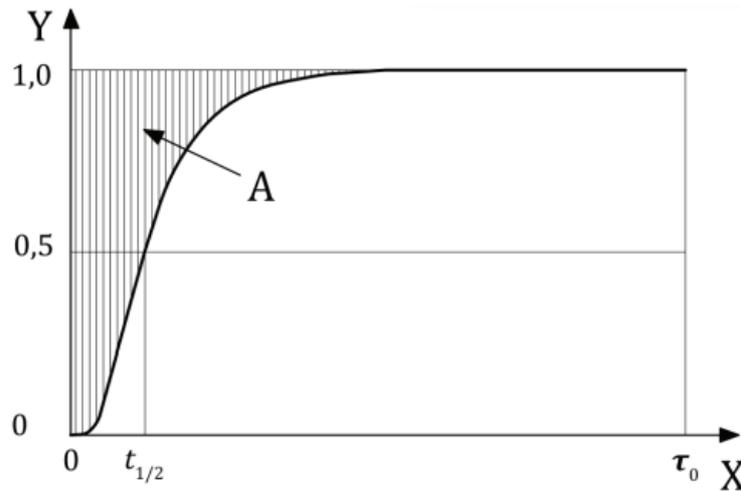


Figura 100: Incremento di temperatura su grafico normalizzato

Dove:

- Y è l'incremento di temperatura normalizzato, pari a $\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}$;
- X è il tempo t ;
- τ_0 è il tempo di diffusione del calore, periodo di tempo che inizia con il riscaldamento della superficie e termina nel momento in cui la temperatura diventa uniforme.
- A è l'area di diffusione del calore, sovrastante al grafico.

Valutata opportunamente l'area di diffusione A , la diffusività di un materiale single-layer, viene calcolata nel seguente modo:

$$\alpha = \frac{d^2}{6A} \quad (8.27)$$

Prendendo in esame una prova a temperatura ambiente, ad esempio la Prova 1, si riportano di seguito i passaggi da seguire per ottenere risultati validi:

1. Normalizzare l'andamento sperimentale;
2. Valutare l'area di diffusione A ;
3. Normalizzare l'andamento simulato dopo avere scelto coefficienti opportuni nella relazione (8.10);
4. Stimare l'area di diffusione dell'andamento simulato A_1 ;
5. Confrontare A e A_1 .

Dunque, in Figura 101 si riporta il confronto tra sperimentale e simulato non normalizzato:

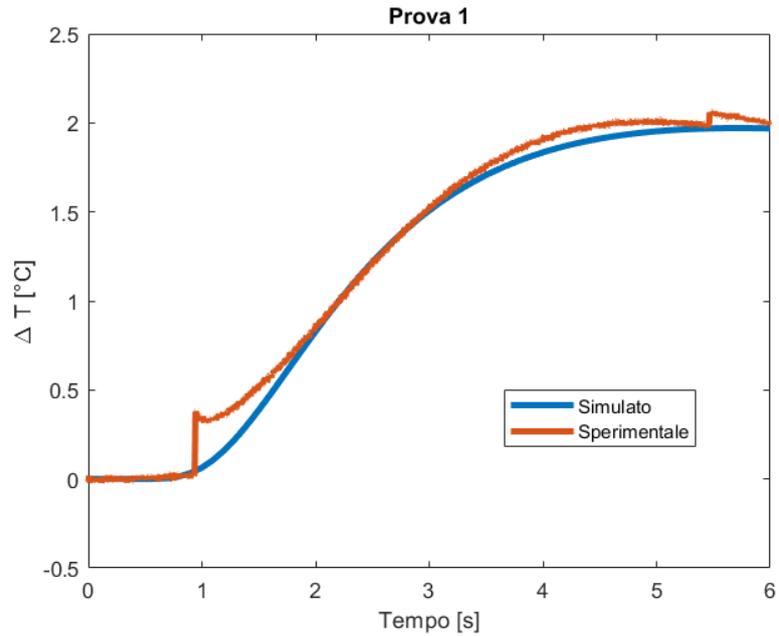


Figura 101: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 Stokvis

Mentre in Figura 102 si riporta il confronto in termini di andamenti normalizzati:

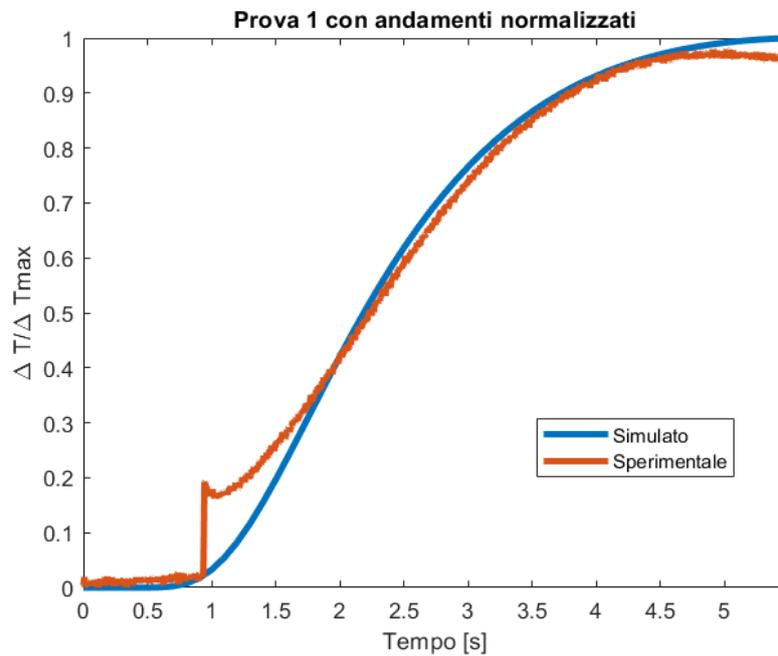


Figura 102: Confronto tra simulato e sperimentale Prova 1 Stokvis metodo delle aree

Confrontando i valori delle due aree di diffusione calcolate per entrambi gli andamenti, si ottiene:

$$A_1 = A \cong 3,14$$

La stessa procedura può essere utilizzata per le altre prove, i cui risultati vengono proposti in Tabella 33:

Prove	Potenza laser	Durata Impulso	σ	δ	φ	η	γ
[-]	[%]	[ms]	[s ^{1/2}]	[s]	[W/ m ²]	[-]	[-]
1	50	10	76,6	2,63	340	2,52	1
2	55	10	76,6	2,63	450	2,52	1
3	60	10	76,6	2,63	470	2,52	1
4	50	5	76,6	2,63	210	1,8	1
5	55	5	76,6	2,63	220	1,8	1
6	60	5	76,6	2,63	240	1,8	1

Tabella 33: Raccolta coefficienti e fattori correttivi campione Stokvis

8.5.3 Mappatura coefficienti e fattori correttivi

Dopo aver raccolto le informazioni relative ai coefficienti e ai fattori correttivi delle due famiglie di materiali, può essere interessante analizzare gli andamenti di tali parametri al variare di specifici valori. Si procede con la valutazione dei coefficienti:

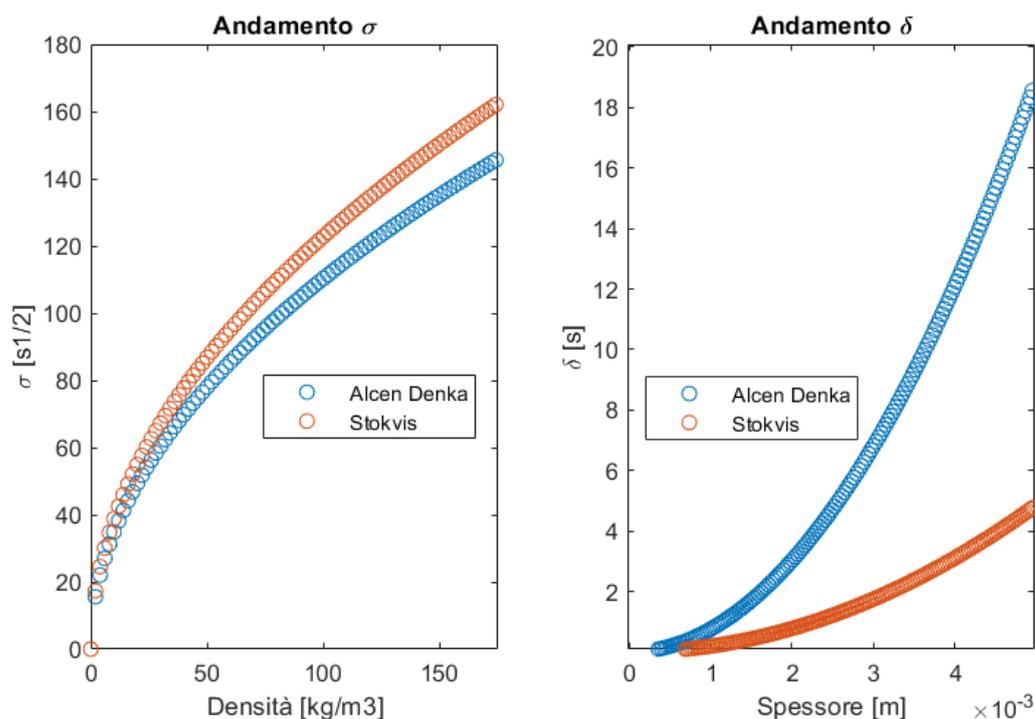


Figura 103: Analisi dell'andamento dei coefficienti

Il grafico di Figura 103 sulla sinistra mostra l'andamento del coefficiente σ al variare della densità del provino indagato. In particolare modo, per i campioni della Alcen paper Denka a parità di R_{eq} , k e c_p , si nota che σ al variare della densità ρ presenta una pendenza leggermente inferiore rispetto all'andamento del materiale Stokvis. Questo poiché a parità di condizioni, quest'ultimi materiali sono caratterizzati da un valore di calore specifico maggiore. Il grafico presente sulla destra invece, evidenzia il comportamento del coefficiente δ al variare dello spessore del provino oggetto di studio. In tal caso si osserva una pendenza maggiore della curva celeste che caratterizza il materiale Stokvis; ciò è dovuto al fatto che la diffusività termica di tali materiali risulta evidentemente maggiore.

Per quanto concerne il fattore correttivo φ , si osserva:

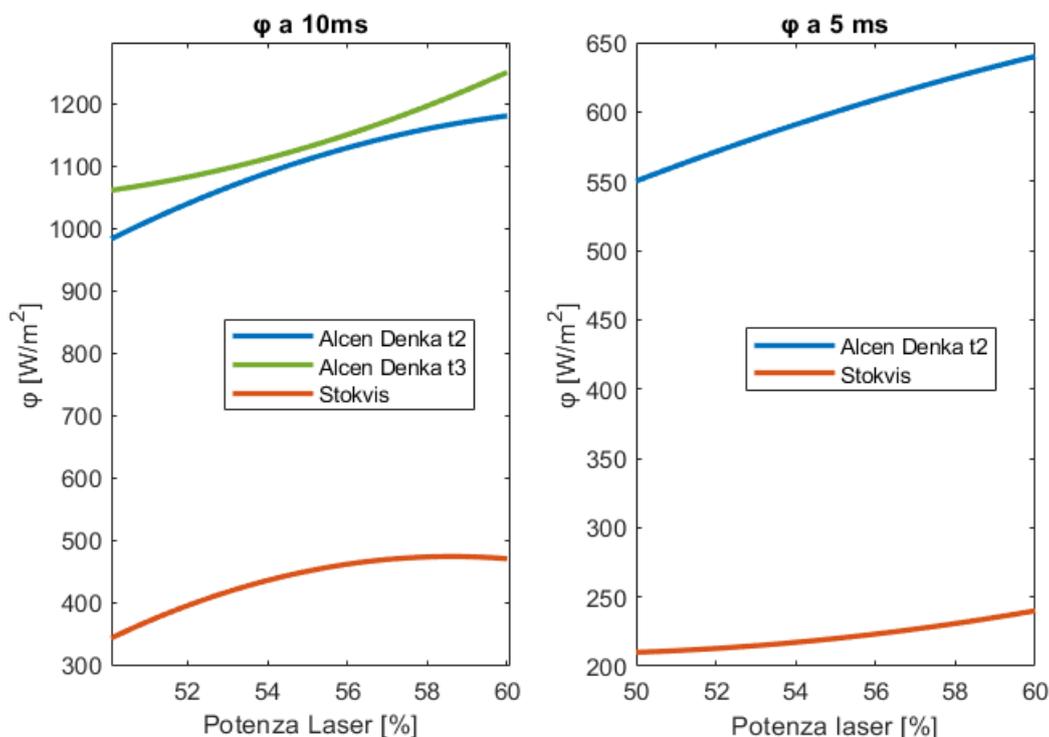


Figura 104: Andamenti fattore correttivo φ

Nel grafici sopra riportati, si analizza il comportamento del fattore correttivo φ al variare della percentuale laser selezionata per una specifica prova. A parità di durata dell'impulso laser pari a 10ms oppure 5ms, è possibile notare che per tutti e tre i provini all'aumentare della potenza del laser, aumenta il valore del fattore φ , seppur con pendenze differenti. La seguente dipendenza può essere giustificata attraverso la valutazione del coefficiente di correlazione, il quale consente di quantificare la forza della relazione lineare tra due variabili. Esso ha valore compreso tra -1 e +1, per cui un coefficiente di correlazione pari a +1 definisce una correlazione lineare positiva perfetta tra le due variabili, un valore pari a 0 corrisponde ad un'assenza di correlazione lineare, mentre un

valore pari a -1 è associato ad una correlazione perfetta negativa. Si raccolgono in Tabella 34 i valori di φ precedentemente valutati:

Potenza laser [%]	$\varphi_{t2\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t2\ 5ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t3\ 20ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t3\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{Stokvis\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{Stokvis\ 5ms}$ [W/ m ²]
50	980	550	2150	1060	340	210
55	1110	600	2300	1130	450	220
60	1180	640	2500	1250	470	240

Tabella 34: Raccolta valori φ al variare della potenza laser

Sulla base dei seguenti dati è possibile valutare il coefficiente di correlazione, in Tabella 35:

	$\varphi_{t2\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t2\ 5ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t3\ 20ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{t3\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{Stokvis\ 10ms}$ [W/ m ²]	$\varphi_{Stokvis\ 5ms}$ [W/ m ²]
Correlazione	0,9853	0,9979	0,9966	0,9887	0,9286	0,9820

Tabella 35: Valutazione dei coefficienti di correlazione

Osservando la tabella sopra riportata, si osserva che il coefficiente di correlazione, calcolato attraverso la funzione di Excel, per ogni gruppo di valori di φ è superiore al 90%. Evidentemente il valore ottenuto, seppur interessante, risulta basato su campioni caratterizzati da un numero non elevato di informazioni. Dunque, per poter ottenere dei risultati statisticamente più validi, risulta opportuno calcolare a monte la covarianza per ciascun gruppo e a valle valutare il coefficiente di correlazione. La covarianza è un valore numerico che definisce un'indicazione preliminare circa la dipendenza esistente tra le due variabili analizzate.

	$\varphi_{t2\ 10ms}$	$\varphi_{t2\ 5ms}$	$\varphi_{t3\ 20ms}$	$\varphi_{t3\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 5ms}$
Media [W/ m ²]	1090	596,7	2316,7	1146,7	420	223,3
σ [W/ m ²]	101,5	45,1	175,6	96,1	70	15,3

Tabella 36: Media e deviazione standard dei gruppi φ

Dopo aver calcolato la media e la deviazione standard di ciascun gruppo, che rappresentano la seconda variabile, si procede con il calcolo delle medesime variabili per la prima variabile, nella fattispecie la potenza laser.

Potenza Laser	
Media [-]	55
σ [-]	5

Tabella 37: Media e deviazione standard della potenza laser

Si procede con la valutazione degli scarti di ciascun valore del gruppo dalla media calcolata per lo stesso. La stessa procedura si applica alla variabile relativa alla potenza del laser. Infine, si calcolano i prodotti degli scarti tra la variabile potenza laser e la variabile φ di gruppo.

	$\varphi_{t2\ 10ms}$	$\varphi_{t2\ 5ms}$	$\varphi_{t3\ 20ms}$	$\varphi_{t3\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 5ms}$
Scarti [W/ m ²]	-110	-47	-167	-87	-80	-13
	20	3	-17	-17	30	-3
	90	43	183	103	50	17

Tabella 38: Valutazione degli scarti su φ

Potenza Laser	
Scarti [-]	-5
	0
	5

Tabella 39: Valutazione degli scarti sulla potenza laser

In Tabella 40 sono riportati da un lato i prodotti tra la prima e la seconda variabile (ciascun gruppo φ), e dall'altro i valori di covarianza e di correlazione:

	$\varphi_{t2\ 10ms}$	$\varphi_{t2\ 5ms}$	$\varphi_{t3\ 20ms}$	$\varphi_{t3\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 10ms}$	$\varphi_{Stokvis\ 5ms}$
Prodotti [W/ m ²]	550	233	833	433	400	67
	0	0	0	0	0	0
Covarianza [W/ m ²]	450	217	917	517	250	83
Correlazione [W/ m ²]	333	150	583	317	217	50
	0,657	0,665	0,664	0,659	0,619	0,655

Tabella 40: Valutazione della covarianza e della correlazione

Come si evince, il coefficiente di correlazione è leggermente inferiore al 70%, per cui è ragionevole pensare che all'aumentare della potenza laser, aumenti il fattore φ .

Per quanto concerne il fattore correttivo γ , come già accennato precedentemente, non può essere variato. Infatti, un valore diverso da 1 comprometterebbe il rispetto dell'analisi dimensionale, elemento indispensabile per garantire la validità del modello.

Per quanto concerne il fattore correttivo η , si osserva:

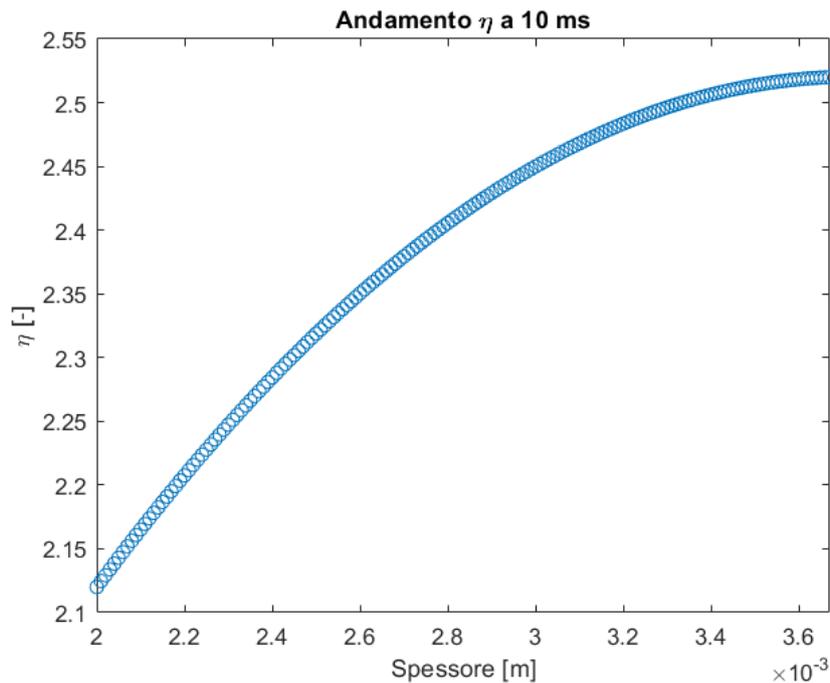


Figura 105: Andamento η al variare dello spessore

Osservando quest'ultimo grafico è possibile notare come varia η al variare dello spessore dei provino indagati, a parità di durata dell'impulso laser: nella fattispecie 10 ms. Il seguente andamento mostra che all'aumentare dello spessore del campione aumenta il contenuto di tale fattore correttivo. Ciò influisce analiticamente sulla pendenza relativa al tratto di riscaldamento per una specifica prova sperimentale; più precisamente all'aumentare di η , la pendenza diminuisce. Ciò può essere spiegato in modo qualitativo considerando che se aumenta lo spessore di un campione analizzato, non si registra un aumento repentino delle temperatura, bensì il processo risulta rallentato dal fatto che il laser incide su uno strato di materiale non trascurabile. Per tale ragione la pendenza del transitorio di riscaldamento risulterebbe più bassa rispetto a quella di un campione più sottile sottoposto al medesimo impulso in termini di durata. Un altro aspetto interessante che si evince dai dati sperimentali è che il fattore η risulta invariante rispetto alla percentuale di potenza del laser. Inoltre, a parità di provino considerato variando la durata dell'impulso laser anche il valore di η cambia; poiché cambia la capacità del provino stesso di assorbire l'impulso proveniente dal laser.

Capitolo 9

Conclusione e sviluppi futuri

L'indagine svolta nel presente lavoro di tesi ha permesso di caratterizzare in modo sperimentale diverse famiglie di materiali, le quali trovano applicazione nell'ambito della trazione elettrica. Attraverso la tecnica della termografia pulsata è stato possibile indagare le proprietà termiche di ciascun materiale oggetto di studio. Risulta indispensabile sottolineare la validità del seguente metodo, poiché la gran parte dei risultati sperimentali ottenuti in termini di conducibilità termica, si avvicinano in modo significativo ai valori presenti sia in letteratura che nei datasheet delle aziende fornitrici. Poiché che la tecnica termografica risulta semplice e rapida da applicare, è stato possibile analizzare sequenzialmente quattro famiglie di materiali differenti in modo dettagliato e completo. Per ciascuna famiglia sono state svolte diverse prove al variare di due parametri di interesse, ossia durata dell'impulso laser e potenza del laser. È stato necessario valutare per ogni singola prova il rispetto delle condizioni di validità previste dalla normativa di riferimento. L'obiettivo ultimo per ogni famiglia di materiali è stato valutare prima la diffusività termica e solo dopo la conducibilità termica. Quest'ultimo parametro assume un significato estremamente importante, poiché consente di valutare l'applicabilità di un materiale nell'economia del pacco batteria delle auto elettriche. I materiali studiati sono adibiti a due tipologie di applicazioni all'interno del pacco batteria stesso: da un lato vengono utilizzati come divisorio tra due celle, dall'altro come rivestimento dell'elettronica presente. Sia gli Alcen Denka che gli Stokvis, a fronte di un basso valore di conducibilità, trovano applicazione come materiali interponenti tra le celle. Inoltre, per le seguenti famiglie è stato possibile valutare il comportamento della conducibilità al variare della temperatura, nel caso in cui in corrispondenza del pacco batteria si dovessero registrare ipotetici malfunzionamenti. Mentre gli ITW Formex e i Busbar batteries in PVC, a fronte di un valore più alto di conducibilità, trovano applicazione come materiali atti a rivestire i collegamenti elettrici previsti nel pacco. Terminata l'indagine sperimentale che ha permesso di definire il campo di applicabilità di ciascun materiale, è stato introdotto un modello che consente di ottenere degli andamenti di temperatura ipotizzando di modellare delle prove di termografia attiva. Sulla base delle prove sperimentali raccolte in laboratorio, si è deciso di ricostruire le curve ottenute per gli Alcen Denka e per gli Stokvis. Per poter ottenere degli andamenti modellizzati adeguati, sono stati definiti sia dei coefficienti che dei fattori correttivi. Essi sono collegati sia alle proprietà dei materiali analizzati, che ai parametri scelti per svolgere le prove



sperimentali. Per ricreare gli andamenti ottenuti per gli Alcen Denka è stato utilizzato esclusivamente il modello, mentre per ricostruire gli andamenti sperimentali degli Stokvis è stata seguita un'altra strada. Dato che quest'ultimi materiali presentano un picco iniziale in corrispondenza del tratto di riscaldamento, non è stato possibile applicare direttamente il modello, il quale si adatta bene solo ad andamenti regolari. Per tale motivo è stato utilizzato a monte il metodo delle aree, ossia valutare l'area di diffusione delle curve sperimentali; mentre a valle è stato utilizzato il modello simulato in modo tale da ottenere una curva fittizia che presentasse il medesimo valore dell'area. I risultati derivanti dal confronto tra sperimentale e simulato mostrano come le curve simulate si avvicinano molto a quelle simulate. Dunque, è possibile affermare che il modello sviluppato risulta estremamente valido. Un limite riscontrato per le varie famiglie, è stato non poter studiare a temperature più elevate il comportamento della conducibilità termica, a causa dello scambio di calore con l'ambiente nel passaggio dal forno alla strumentazione termografica. In termini di ricerca potrebbe essere interessante trovare delle soluzioni più agevoli per prelevare i campioni dal forno a Muffola e trasferirli in corrispondenza della strumentazione termografica, in modo da preservare il contenuto termico posseduto dai campioni grazie alla permanenza temporanea nel forno stesso. Inoltre, potrebbe essere interessante identificare delle formulazioni analitiche per i fattori correttivi, in modo tale da poter indagare in modo ancor più dettagliato nuove famiglie di materiali. Infine, il lavoro di ricerca nell'ambito termografico potrebbe essere esteso anche allo studio dei liquidi, in modo tale da incrementare non solo il bagaglio di conoscenze circa l'applicazione di tale approccio, ma anche il numero di informazioni in letteratura .

Bibliografia

- [1] Bashirpour-Bonab, Hadi. "Thermal Behavior of Lithium Batteries Used in Electric Vehicles Using Phase Change Materials." *International Journal of Energy Research* 44.15 (2020): 12583-2591. Web.
- [2] Arora, Shashank. "Selection of Thermal Management System for Modular Battery Packs of Electric Vehicles: A Review of Existing and Emerging Technologies." *Journal of Power Sources* 400 (2018): 621-40. Web.
- [3] Durgam, Shankar, Priyanka Datir, Onkar Tawase, Dipak Savant, Ganesh Tapkir, > Ravi M. Warkhedkar, and Nikita M. Gawai. "Materials Selection for Hybrid and Electric Vehicle Battery Pack Thermal Management: A Review." *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* 1126.1 (2021): 12072. Web.
- [4] Javani, N., I. Dincer, G.F Naterer, and G.L Rohrauer. "Modeling of Passive Thermal Management for Electric Vehicle Battery Packs with PCM between Cells." *Applied Thermal Engineering* 73.1 (2014): 307-16. Web.
- [5] Ling, Ziye, Xiaoyan Wen, Zhengguo Zhang, Xiaoming Fang, and Xuenong Gao. "Thermal Management Performance of Phase Change Materials with Different Thermal Conductivities for Li-ion Battery Packs Operated at Low Temperatures." *Energy (Oxford)* 144 (2018): 977-83. Web.
- [6] Ibarra-Castanedo, Clemente, Jean-Marc Piau, Stéphane Guilbert, Nicolas P. Avdelidis, Marc Genest, Abdelhakim Bendada, and Xavier P. V. Maldague. "Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures." *Research in Nondestructive Evaluation* 20.1 (2009): 1-31. Web.
- [7] W. Ben Larbi, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein, A. Bendada, and X. Maldague. "Experimental Comparison of Lock-in and Pulsed Thermography for the Nondestructive Evaluation of Aerospace Materials". Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (Quebec) G1V 0A6 Canada.
- [8] Bagavac, P. Lock-in thermography image processing.
- [9] Bison, P., F. Cernuschi, and S. Capelli. "A Thermographic Technique for the Simultaneous Estimation of In-plane and In-depth Thermal Diffusivities of TBCs." *Surface & Coatings Technology* 205.10 (2011): 3128-133. Web.
- [10] Doshvarpassand, Siavash, Changzhi Wu, and Xiangyu Wang. "An Overview of Corrosion Defect Characterization Using Active Infrared Thermography." *Infrared Physics & Technology* 96 (2019): 366-89. Web.
- [11] Usamentiaga, Rubén, Pablo Venegas, Jon Guerediaga, Laura Vega, Julio Molleda, and Francisco G Bulnes. "Infrared Thermography for Temperature

- Measurement and Non-destructive Testing." *Sensors* 14.7 (2014): 12305-2348. Web.
- [12] Multides System Laser Manual.
- [13] DC084U-D User Manual X6540sc - X6550sc.
- [14] ResearchIR 4 User's Guide.
- [15] Vademecum MultiDES System Laser.
- [16] Manuale IRTA 2
- [17] ISO 18755: Fine ceramics [advanced ceramics, advanced technical ceramics] — Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method.
- [18] Hamrock, Jacobson and Schmid, 1998 McGraw-Hill.
- [19] Rodríguez-Pérez, M.A., O. Alonso, J. Souto, and J.A. De Saja. "Thermal Conductivity of Physically Crosslinked Closed Cell Polyolefin Foams." *Polymer Testing* 16.3 (1997): 287-98. Web.
- [20] Mathur, Vishal, Pramod Kumar Arya, and Kananbala Sharma. "Estimation of Activation Energy of Phase Transition of PVC through Thermal Conductivity and Viscosity Analysis." *Materials Today : Proceedings* 38 (2021): 1237-240. Web.
- [21] Serra, C., A. Tadeu, and N. Simões. "Heat Transfer Modeling Using Analytical Solutions for Infrared Thermography Applications in Multilayered Buildings Systems." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 115 (2017): 471-78. Web.
- [22] Dobri, Adam, A. Tsiantis, T.D. Papathanasiou, and Yanwei Wang. "Investigation of Transient Heat Transfer in Multi-scale PCM Composites Using a Semi-analytical Model." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 175 (2021): 121389. Web.
- [23] Lopez, Fernando, Vicente De Paulo Nicolau, Clemente Ibarra-Castanedo, and Xavier Maldague. "Thermal- numerical Model and Computational Simulation of Pulsed Thermography Inspection of Carbon Fiber-reinforced Composites." *International Journal of Thermal Sciences* 86.86 (2014): 325-40. Web.
- [24] Peeters, J., C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, X. Maldague, J.J.J. Dirckx, and G. Steenackers. "Robust Quantitative Depth Estimation on CFRP Samples Using Active Thermography Inspection and Numerical Simulation Updating." *NDT & E International : Independent Nondestructive Testing and Evaluation* 87 (2017): 119-23. Web.
- [25] Rodríguez-Martín, Manuel, José G. Fueyo, Diego Gonzalez-Aguilera, Francisco J. Madruga, Roberto García-Martín, Ángel Luis Muñoz, and Javier Pisonero. "Predictive Models for the Characterization of Internal Defects in Additive Materials from Active Thermography Sequences Supported by Machine Learning Methods." *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.14 (2020): 3982. Web.
- [26] N. Araki, A. Makino, T. Ishiguro e J. Mihara, «An analytical solution of temperature response in multilayered materials for transient methods,» *International Journal of Thermophysics*, vol. 13, n. 3, pp. 515-538, 1992.
- [27] T. Baba, «Analysis of One-dimensional Heat Diffusion after Light Pulse Heating by the Response Function Method,» *Japanese Journal of Applied Phys.*, vol. 48, n. 5S2, p. 05EB04, 2009.