

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Aeronautica



Sviluppo di una tecnica di analisi termoelastica basata su estensimetri infrarossi in materia plastica

Relatore: ing. A. Salerno
Correlatori: dott. L. Merletti
dott. G. Fantoni

Oscar Gazzola Mat: 675738

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento alle persone che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro di tesi: al dott. Luigi Merletti, al dott. Gabriele Fantoni e all'ing. Antonio Salerno per aver dato la disponibilità e il supporto all'attività. Desidero ringraziare inoltre tutti i tecnici e il personale dei laboratori CnD (controlli non distruttivi) di Agusta-Westland che hanno concorso alla realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno dato in questi anni di studio e i compagni di università per le tante ore trascorse assieme.

Indice

Indice	I
Elenco delle figure	V
Elenco delle tabelle	IX
Sommario e Abstract	2
Introduzione	5
1 Analisi Termografica degli sforzi TSA	7
1.1 Introduzione	7
1.2 L'effetto termoelastico	7
1.2.1 Effetto termoelastico: derivazione teorica	8
2 Estensimetria ed estensimetria infrarossa	11
2.1 Introduzione	11
2.2 L'estensimetro resistivo	12
2.3 L'estensimetro infrarosso	14
2.3.1 Applicazioni dell'estensimetria infrarossa	15
2.4 Scelta preliminare del materiale per gli estensimetri infrarossi	16
3 Modello numerico	19
3.1 Introduzione	19
3.2 Il Modello fisico	20
3.3 Ipotesi e Condizioni al Contorno del problema	22
3.4 Realizzazione del Modello numerico 1-D	24
3.4.1 Discretizzazione dell'Equazione di conduzione nei nodi centrali	24
3.4.2 Condizioni al contorno sull'asse	25

3.4.3	Discretizzazione dell'Equazione di conduzione nel nodo $k = n$	25
3.5	Risultati	27
3.5.1	Calcolo dello spessore degli estensimetri	27
3.5.2	Calcolo della temperatura attraverso lo spessore dell'estensimetro	28
4	Calibrazione della costante termoelastica	35
4.1	Introduzione	35
4.2	Modalità di prova	35
4.3	Determinazione dei carichi di calibrazione	37
4.4	Risultati della calibrazione	39
4.4.1	Risultati della calibrazione per il Polivinilcloruro (<i>PVC</i>)	39
4.4.2	Risultati della calibrazione per la resina Poliammidica (<i>PA6</i>)	42
5	Primo test su provino in lega di Alluminio	47
5.1	Introduzione	47
5.2	Modalità di prova	48
5.2.1	Adesivi utilizzati	48
5.2.2	Apparecchiatura utilizzata	49
5.2.3	Preparazione dei provini in lega di Alluminio 7075T6	50
5.2.4	Scelta dei carichi e delle frequenze di prova	53
5.3	Risultati ottenuti con gli estensimetri in PVC	56
5.4	Risultati ottenuti con gli estensimetri resistivi	62
5.5	Confronto tra gli estensimetri all'infrarosso in PVC e gli estensimetri resistivi	64
5.6	Risultati ottenuti con gli estensimetri in PA6	64
6	Secondo test su provino in lega di Alluminio	67
6.1	Introduzione	67
6.2	Modalità di prova	67
6.2.1	Scelta dei carichi e delle frequenze di prova	67
6.3	Risultati	68

7	Prove con estensimetri inclinati	75
7.1	Introduzione	75
7.2	Modalità di prova	76
7.2.1	Preparazione del provino in lega di Alluminio 7075T6	77
7.2.2	Scelta dei carichi e della frequenza di prova . . .	78
7.3	Risultati	79
8	Conclusioni e sviluppi futuri	87
A	Ricerca del materiale	91
A.1	Introduzione al lavoro	91
A.2	Le caratteristiche tecniche necessarie	92
A.3	Contatti utili	92
	Bibliografia	95
	Bibliografia	95

Elenco delle figure

1.1	Analogia tra la compressione adiabatica di un solido e l'effetto termoelastico.	8
2.1	Schema di un estensimetro resistivo a griglia singola. . .	13
2.2	Estensimetro resistivo a griglia singola.	13
2.3	Esempio di applicazione di estensimetri resistivi su componente elicotteristico.	13
2.4	Particolare sull'incollaggio degli estensimetri in metallo.	15
3.1	Configurazione del problema in esame.	21
3.2	Configurazione del problema: condizioni al contorno simmetriche.	23
3.3	Configurazione del problema: andamento della temperatura su parete semi-infinita.	23
3.4	Discretizzazione spaziale del semispessore dell'estensimetro.	23
3.5	Particolare sulla discretizzazione spaziale del semispessore dell'estensimetro.	26
3.6	Differenza di temperatura tra la superficie e il centro dell'estensimetro.	28
3.7	Curva di adiabaticità, frequenza-spessore per PVC. . .	29
3.8	Curva di adiabaticità, frequenza-spessore per PA6. . . .	29
3.9	Particolare sulla curva di adiabaticità, frequenza-spessore per il PEEK.	30
3.10	Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PVC sottoposto a 1.4 MPa.	31
3.11	Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PVC sottoposto a 3 MPa.	31
3.12	Andamento della differenza di temperatura tra mezzeria e superficie in funzione della frequenza per un estensimetro in PVC sottoposto a 3 MPa.	32

3.13	Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PA6 sottoposto a 1.4 MPa.	32
3.14	Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PA6 sottoposto a 3 MPa.	33
3.15	Andamento della differenza di temperatura tra mezzeria e superficie in funzione della frequenza per un estensimetro in PA6 sottoposto a 3 MPa.	33
4.1	Schema della prova di calibrazione	36
4.2	Installazione del provino sulla macchina di prova	37
4.3	Tipologia di sforzo applicato nella TSA	38
4.4	Particolare sull'acquisizione dell'immagine termografica per il provino in PVC sottoposto a 1650N di carico dinamico.	42
4.5	Rette di calibrazione per le tre frequenze di prova. . . .	43
4.6	Retta di calibrazione.	43
4.7	Particolare sull'acquisizione dell'immagine termografica per il provino in PA6 sottoposto a 1100N di carico dinamico.	43
4.8	Rette di calibrazione per le tre frequenze di prova del PA6.	45
5.1	Disposizione dell'apparecchiatura di prova.	50
5.2	Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione.	52
5.3	Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione dell'estensimetro e della bassetta di collegamento.	52
5.4	Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione dei cavi di rame tra estensimetro e bassetta di collegamento.	53
5.5	Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione degli estensimetri infrarossi.	54
5.6	Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: posizionamento degli estensimetri in PVC in asse con la direzione di applicazione del carico.	54
5.7	Particolare sulle prove svolte con gli estensimetri in PVC: il valore del ΔT acquisito non dipende dal punto di rilevazione sulla superficie dell'estensimetro.	57

6.1	Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG ad 1Hz	70
6.2	Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG a 5Hz	70
6.3	Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG a 10Hz	71
7.1	Posizionamento dell'IRSG rispetto all'asse di applicazione del carico.	76
7.2	Schema di posizionamento degli IRSG sul provino in alluminio.	77
7.3	Posizionamento degli estensimetri infrarossi sul provino in alluminio.	78

Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche di alcuni materiali presi in considerazione per la realizzazione degli IRSGs	17
4.1	Carichi e frequenze di prova utilizzati durante le calibrazioni dei materiali	39
4.2	Risultati calibrazione del PVC	41
4.3	Risultati calibrazione del PA6	44
5.1	Carichi e frequenze di prova utilizzati durante le prove sugli estensimetri in PA6 e PVC	55
5.2	Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo Epoxy plus	58
5.3	Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo RS	59
5.4	Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo AE10	60
5.5	Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo Click-bond	61
5.6	Caratteristiche degli estensimetri resistivi HBM utilizzati	62
5.7	Risultato ottenuto con l'estensimetro resistivo	63
5.8	Confronto tra estensimetro infrarosso in PVC incollato con <i>Epoxy Plus</i> ed estensimetro resistivo	66
5.9	Risultati per estensimetro in PA6 incollato con adesivo <i>Epoxy Plus</i>	66
6.1	Carichi applicati nelle prove a livelli di sforzo maggiore	68
6.2	Risultati ottenuti con gli estensimetri infrarossi per le misure effettuate a carichi maggiori	72

6.3	Risultati ottenuti con gli estensimetri resistivi per le misure effettuate a carichi maggiori	73
7.1	Carichi applicati nelle prove con IRSGs inclinati	78
7.2	Riepilogo risultati finali: media delle deformazioni rilevate dagli estensimetri ed errori percentuali commessi.	81
7.3	Riepilogo risultati finali: andamento dell'errore percentuale nella stima della deformazione in funzione del carico applicato e dell'inclinazione dell'estensimetro.	81
7.4	Risultati ottenuti con l'IRSG n°1 parallelo all'asse del carico: errori percentuali in media con gli errori percentuali commessi nelle prove di Cap.5 e Cap.6	82
7.5	Risultati ottenuti con l'IRSG n°2 inclinato di 30° rispetto all'asse di applicazione del carico	83
7.6	Risultati ottenuti con l'IRSG n°3 inclinato di 45° rispetto all'asse di applicazione del carico	84
7.7	Risultati ottenuti con l'IRSG n°4 inclinato di 90° rispetto all'asse di applicazione del carico	85
A.1	Alcune delle aziende contattate per l'approvvigionamento di materiale plastico	94

Sommario

L'estensimetria infrarossa vuole proporsi come valida alternativa a quella resistiva grazie alla semplicità che caratterizza la messa in opera degli estensimetri infrarossi rispetto a quelli resistivi. L'estensimetria infrarossa sfrutta l'effetto termoelastico per la rilevazione delle deformazioni strutturali. In questo lavoro di tesi la scelta del materiale con cui realizzare gli estensimetri si è rivolta alla plastica, così da eliminare le problematiche dovute all'eccessiva rigidità che caratterizza gli estensimetri infrarossi realizzati in metallo. Un'analisi preliminare ha orientato la scelta verso il Polivinilcloruro (PVC) e il Poliammide6 (PA6). Gli estensimetri realizzati con questi materiali sono stati incollati ad un provino in lega di alluminio posto in prova a fatica ciclica. Durante i test si è voluto verificare l'influenza del carico, delle frequenze di prova e degli adesivi utilizzati per l'incollaggio degli estensimetri. I risultati ottenuti hanno dimostrato come l'utilizzo di un estensimetro in PVC risolva alcune delle problematiche che si erano manifestate con gli estensimetri metallici.

Parole chiave:Analisi termoelastica delle tensioni, estensimetri all'infrarosso, misura delle tensioni.

Abstract

The infrared gauge presents itself as an alternative to the resistive gauge due to the simplicity of use that characterizes the application of infrared compared to resistive strain gauges. Infrared gauges use the thermoelastic effect for the detection of structural deformation. In this work the choice of material with which to achieve the strain gauges fell on plastic, to eliminate the problems caused by excessive stiffness that characterizes infrared gauges made of metal. Preliminary analysis has guided the choice to Polyvinyl Chloride (PVC) and Polyamide (PA6). The strain gauges made of these materials were glued to a specimen of aluminum alloy placed under cyclic fatigue. During testing the influence of load, testing frequency and adhesives used for bonding strain gauges were verified. The results obtained showed how the use of a PVC strain gauge solves some of the problems that had come with metal strain gauges.

Keywords:Thermoelastic stress analysis, infrared strain gauges, stress

measurement.

Introduzione

Il lavoro di tesi si inserisce nell'ambito della collaborazione tra il Politecnico di Milano e AgustaWestland nell'utilizzo della termografia per l'analisi sperimentale delle sollecitazioni strutturali.

Nel campo aeronautico, dove si inserisce la produzione di Agusta, la determinazione degli stati di sforzo nei punti più sollecitati è un aspetto critico dato che le esigenze di resistenza e leggerezza presenti nella progettazione strutturale portano spesso a progettare i componenti secondo il criterio della *Damage tolerance*. La Damage Tolerance (*Tolleranza al danno*) è la proprietà che permette ad una struttura di sostenere i difetti in modo sicuro fino alla sua riparazione o sostituzione. Con l'introduzione di questa filosofia progettuale si rende necessario l'utilizzo di controlli non distruttivi che misurino la propagazione del danneggiamento nel pezzo e stabiliscano quando la vita operativa di un pezzo sia da considerarsi conclusa o meno. Lo sviluppo di metodi teorici e numerici per predire le deformazioni e quindi le azioni interne in un componente reale non ha ancora sostituito la pratica sperimentale basata sulle misure estensimetriche durante le prove di fatica che testano le reali condizioni di esercizio che la struttura incontra durante la vita operativa.

Attualmente questa tecnica prevede l'utilizzo di estensimetri resistivi. L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico. L'estensimetro viene incollato sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni così che il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa: questo fenomeno causa una variazione della resistenza elettrica del filo fornendo, tramite opportune relazioni, la deformazione strutturale associata.

L'Analisi Termoelastica delle Tensioni (in inglese Thermoelastic Stress Analysis - TSA) è stata introdotta in Agusta allo scopo di individuare le aree maggiormente sollecitate ed estendere sperimentalmente

la misura delle tensioni a tutta la superficie del pezzo in esame. La TSA si basa sull'effetto termoelastico: quando un volume di materiale subisce una rapida compressione oppure una dilatazione, si riscalda oppure si raffredda, analogamente a quanto accade comprimendo od espandendo un gas adiabaticamente. Nel caso ideale senza diffusione di calore la variazione di temperatura che si genera per effetto di una deformazione è proporzionale al primo invariante degli sforzi, ovvero a quella parte del tensore degli sforzi responsabile della variazione di volume.

Il lavoro di tesi si inserisce in questo contesto volendo sperimentare una procedura innovativa nell'analisi strutturale che unisca i vantaggi della TSA con quelli dell'estensimetria classica (resistiva) e che viene denominata estensimetria all'infrarosso. Gli estensimetri all'infrarosso **IRSGs** (**I**nfrared **s**trip **g**auges) studiati in questo lavoro di tesi sono stati realizzati con delle placchette di materiale plastico incollate sulla superficie di un provino in lega di alluminio sottoposto a carico ciclico. L'incollaggio tra il singolo IRSG e il provino fa sì che a seguito di una deformazione del provino corrisponda una deformazione dell'estensimetro che subisce così uno stato di sforzo monoassiale. Sfruttando l'effetto termoelastico è possibile mediante la termocamera misurare la differenza di temperatura dovuta a tale sforzo.

La motivazione che ha spinto questo studio è il vantaggio che questa tecnica può fornire sia rispetto all'estensimetria classica che alla TSA classica; nel primo caso il vantaggio risiede nel fatto che la messa in opera di queste placchette richiede una complicazione decisamente minore rispetto agli estensimetri resistivi e alla loro relativa cablatura; nel secondo caso il vantaggio è dovuto al fatto che la TSA da sola non è in grado di separare le componenti principali degli sforzi mentre con questa tecnica è possibile misurare separatamente le varie componenti della tensione.

1

Analisi Termografica degli sforzi TSA

1.1 Introduzione

Il modo migliore per spiegare l'effetto termoelastico è certamente l'analogia con la compressione di un gas (Figura 1.1). Quando un gas viene compresso in un recipiente adiabatico la sua temperatura aumenta, al contrario, se il volume nel quale è contenuto il gas viene dilatato adiabaticamente, questi si raffredda. Tale fenomeno ovvero il riscaldamento sotto compressione ed il raffreddamento durante una dilatazione avviene anche nei solidi, ma l'entità della variazione di temperatura è molto ridotta, in genere dell'ordine di qualche millikelvin. Inoltre, mentre nel caso della variazione di volume dei gas l'adiabaticità del processo è garantita dalle caratteristiche del recipiente, nel caso dei solidi non si ha nessun vincolo che impedisca al calore generato in un punto di diffondersi ai punti limitrofi. Le condizioni per le quali si ha l'adiabaticità del fenomeno dipendono dal materiale e dal tipo di sforzo: aumentando la frequenza alla quale viene applicato il carico ci si avvicina sempre di più alle condizioni adiabatiche. La relazione tra la variazione di temperatura ed il carico applicato prende il nome di effetto termoelastico.

1.2 L'effetto termoelastico

L'effetto termoelastico è la relazione che lega l'aumento di temperatura alla variazione di sforzo in un punto del materiale. In particolare, lo sforzo cui si fa riferimento è il primo invariante degli sforzi: in ogni punto, lo stato di sforzo può essere diviso in due componenti, una componente idrostatica ed una componente deviatorica. La componente

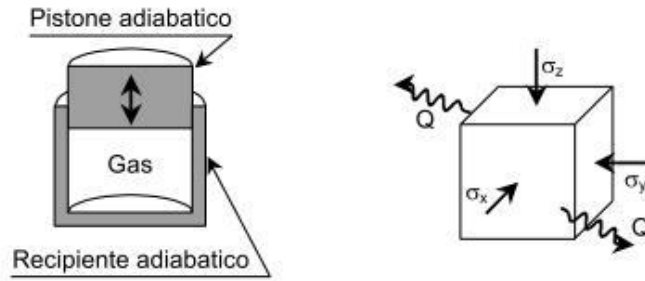


Figura 1.1: Analogia tra la compressione adiabatica di un solido e l'effetto termoelastico.

idrostatica di sforzo è legata al primo invariante degli sforzi ed è quella componente di sforzo che causa la variazione di volume dell'elemento considerato quindi, essendo la variazione di temperatura legata alla variazione di volume si avrà che la variazione di temperatura dipende unicamente dalla variazione della componente idrostatica dello sforzo. Nella componente idrostatica degli sforzi, non compaiono le tensioni tangenziali τ_{ij} mentre, al contrario, la componente deviatorica è funzione delle componenti tangenziali di sforzo ed è quella componente che causa la variazione di forma dell'elemento. Il tensore degli sforzi $[\sigma]$ è definito come

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_x - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - p \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

il primo invariante degli sforzi I_1^σ è dato dalla somma degli elementi presenti sulla diagonale del tensore

$$\begin{aligned} I_1^\sigma &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ &= 3p \end{aligned} \quad (1.2)$$

1.2.1 Effetto termoelastico: derivazione teorica

Le ipotesi che stanno alla base della teoria dell'effetto termoelastico sono:

1. sistema in condizioni adiabatiche
2. processo reversibile (deformazioni elastiche)
3. le proprietà elastiche e termiche del materiale sono ritenute costanti rispetto alla temperatura
4. materiale isotropo

L'Eq.1.3 esprime la variazione di entropia ds :

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T \cdot dp + \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \cdot dT \quad (1.3)$$

dove:

- p è la pressione;
- T è la temperatura.

Utilizzando la relazione di Maxwell si può riscrivere il primo termine di Eq.1.3 come segue:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1.4)$$

il coefficiente di dilatazione cubica β è esprimibile dalla seguente relazione

$$\beta = \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1.5)$$

e quindi il primo termine di Eq.1.3 diventa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T \cdot dp = -v \cdot \beta \cdot dp \quad (1.6)$$

Il secondo termine di Eq.1.3 può essere riscritto in funzione del Calore specifico a pressione costante C_p attraverso l'Eq.1.7

$$C_p = T \cdot \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \quad (1.7)$$

Inserendo in Eq.1.3 le relazioni trovate si ottiene:

$$ds = \frac{C_p}{T} \cdot dT - v \cdot \beta \cdot dp \quad (1.8)$$

Grazie alla seconda ipotesi, la variazione di entropia ds è nulla e quindi Eq.1.8 diventa

$$ds = 0 \Rightarrow dT = \frac{T \cdot v \cdot \beta}{C_p} \cdot dp \quad (1.9)$$

che può essere riscritta come

$$dT = \frac{T \cdot \beta}{\rho \cdot C_p} \cdot dp \quad (1.10)$$

dove ρ è la densità del materiale. Il coefficiente di dilatazione cubica β è legato al coefficiente di dilatazione lineare α dalla relazione

$$\beta = 3 \cdot \alpha \quad (1.11)$$

Il legame tra la variazione di tensione e la variazione di pressione idrostatica è dato dall'equazione (1.12):

$$\delta p = -\frac{1}{3} \cdot \delta I_1^\sigma \quad (1.12)$$

Inserendo Eq.1.11 ed Eq.1.12 in Eq.1.10 si ottiene la *relazione termoelastica fondamentale* Eq.1.13 che lega la variazione di temperatura alla variazione del primo invariante degli sforzi.

$$\frac{\delta T}{T_0} = -\frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \cdot \delta I_1^\sigma \quad (1.13)$$

dove T_0 è la temperatura di riferimento che per noi è la temperatura ambiente. Introducendo la definizione di *Costante termoelastica del materiale* definita come [1] [2]

$$K_{el} = \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \quad (1.14)$$

si può riscrivere l'Eq.1.13 come

$$\delta T = -K_{el} \cdot T_0 \cdot \delta I_1^\sigma \quad (1.15)$$

2

Estensimetria ed estensimetria infrarossa

2.1 Introduzione

L'*estensimetro* è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni che possono essere di natura meccanica o termica. Misurando le deformazioni e conoscendo a priori le caratteristiche meccanico/fisiche della struttura deformata si può risalire alle tensioni locali a cui è sottoposta. Applicando gli estensimetri in modo accurato, è possibile rilevare la direzione e il verso di queste deformazioni, e delle tensioni. I campi d'applicazione principali sono:

- test in laboratorio su componenti meccanici o materiali;
- analisi statiche e dinamiche di componenti o sistemi meccanici già montati;
- monitoraggio di componenti o sistemi strutturali;

Nelle attuali applicazioni, per le loro ottime caratteristiche generali, gli estensimetri elettrici a resistenza sono la tipologia più diffusa tanto che oggi, quando si parla di *estensimetri*, normalmente si sottintende questa categoria. L'estensimetria resistiva è una tecnica ormai consolidata da tempo e per tale motivo, se ne conoscono alla perfezione i limiti e si sa come correggere i dati acquisiti o come eliminare ogni forma di errore durante le acquisizioni (ad esempio, tramite i compensatori termici se il pezzo è soggetto a sbalzi di temperatura, oppure per compensare la resistenza offerta dai cavi di collegamento nel caso in cui gli estensimetri siano molto lontani dall'amplificatore cui sono collegati). È una tecnica che ha raggiunto una notevole affidabilità ed un'elevata precisione.

2.2 L'estensimetro resistivo

L'estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico. Venne inventato da Edward E. Simmons e Arthur C. Ruge nel 1938. L'estensimetro viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni. Il filo dell'estensimetro segue le deformazioni della superficie a cui è incollato, allungandosi ed accorciandosi insieme ad essa; queste variazioni dimensionali causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Misurando, tramite un ponte di Wheatstone o altro sistema tali variazioni, si può risalire all'entità della deformazione che le ha causate. Le dimensioni di un estensimetro possono variare da pochi millimetri ad alcuni centimetri. Quelli di dimensioni minori sono utilizzati per misure puntuali, cioè per conoscere il valore delle deformazioni in un punto preciso, mentre quelli di maggior lunghezza sono utili per rilevare la deformazione media relativa ad un'area più estesa. In Figura 2.1 è riportato lo schema tipico di un estensimetro resistivo: la lunghezza complessiva della griglia è pari ad l ; detta A_{sg} la sezione trasversale del filo che costituisce la griglia, ρ_{sg} la resistività (espressa in [Wm]), la resistenza complessiva R_{sg} di tale resistore è data dalla *prima legge di Ohm* (eq. 2.1). La variazione di resistenza ΔR_{sg} è legata alla deformazione parallela alla griglia ε_{sg} dalla relazione (2.2). Rilevando la variazione di resistenza ai capi di un estensimetro è allora possibile risalire alla deformazione che l'ha causata.

$$R_{sg} = \frac{\rho_{sg} \cdot l}{A_{sg}} \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta R_{sg}}{R_{sg}} = k_{sg} \cdot \varepsilon_{sg} \quad (2.2)$$

dove:

- k_{sg} è il *Gauge factor* dell'estensimetro resistivo
- ε_{sg} è la deformazione dell'estensimetro resistivo

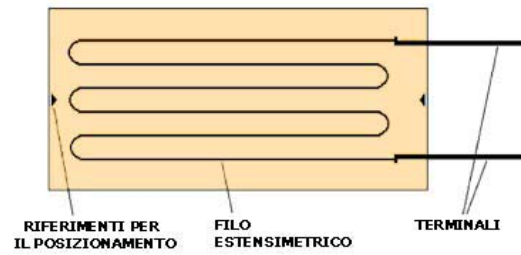


Figura 2.1: Schema di un estensimetro resistivo a griglia singola.

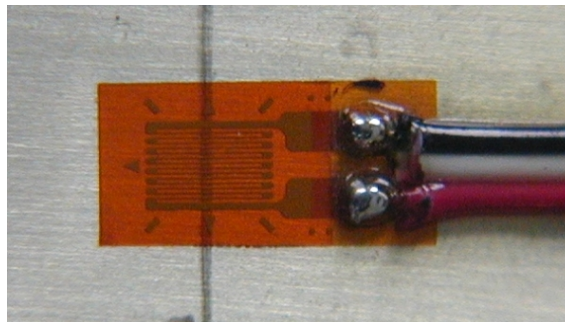


Figura 2.2: Estensimetro resistivo a griglia singola.

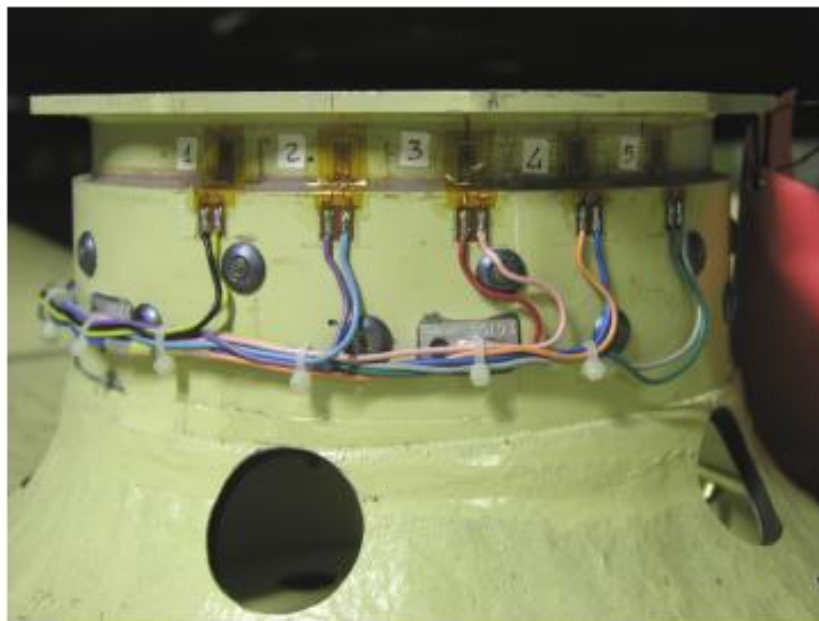


Figura 2.3: Esempio di applicazione di estensimetri resistivi su componente elicotteristico.

2.3 L'estensimetro infrarosso

Gli estensimetri resistivi hanno alcuni svantaggi: hanno una struttura molto leggera, quindi delicata, e la loro messa in opera ha bisogno di collegamenti effettuati mediante cavi. La tipica configurazione di prova prevede che ogni estensimetro (o per lo meno, ogni ponte di Wheatstone) sia collegato ad un singolo amplificatore, che ogni amplificatore sia alimentato, e che l'uscita di ogni amplificatore sia collegata ad un modulo per le acquisizioni. Tutto ciò fa capire come la gestione di tutta l'operazione possa essere molto complicata anche con l'utilizzo di pochi estensimetri come riportato in Figura 2.3 dove viene illustrata una tipica applicazione di estensimetri all'infrarosso su un componente elicotteristico. L'estensimetria infrarossa si propone di cercare di risolvere le problematiche dovute all'installazione e alla gestione degli estensimetri resistivi attraverso una maggior facilità di installazione, e l'eliminazione del sistema di cablaggio. L'idea di base è la stessa che caratterizza gli estensimetri classici: un qualsiasi elemento di forma rettilinea, vincolato alla superficie del pezzo, legge una deformazione parallela all'asse principale di tale elemento. Negli estensimetri resistivi l'effetto che si utilizza è la variazione di resistenza dovuta alla deformazione, negli estensimetri ad infrarossi l'effetto che si utilizza è la variazione di temperatura dovuta alla deformazione (eq. 2.3).

$$\begin{aligned}\delta T &= -\frac{T_0\alpha}{\rho C_p} \cdot \delta\sigma_{\text{irsg}} \\ &= -\frac{T_0\alpha}{\rho C_p} \cdot E_{\text{irsg}} \cdot \delta\varepsilon\end{aligned}\quad (2.3)$$

Gli estensimetri ad infrarossi sono costituiti da una placchetta molto sottile, incollata attraverso le estremità alla superficie del pezzo di cui si vuole rilevare la deformazione, in tale modo l'adesivo con cui si vincola la placchetta trasferisce la deformazione dalla struttura in analisi all'estensimetro. L'estensimetro viene quindi sottoposto ad uno sforzo dovuto alla deformazione imposta, tale sforzo genera per effetto termoelastico una differenza di temperatura proporzionale allo sforzo stesso e quindi alla deformazione. Una peculiarità dell'estensimetria infrarossa risiede nel fatto che il carico deve essere ciclico.



Figura 2.4: Particolare sull'incollaggio degli estensimetri in metallo.

2.3.1 Applicazioni dell'estensimetria infrarossa

Questo lavoro di tesi parte dai risultati del lavoro svolto dall'Ing. Gallotti nella sua tesi di laurea svolta in collaborazione tra AgustaWestland e il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano [3].

I materiali utilizzati nel suo lavoro di tesi per la realizzazione degli estensimetri infrarossi furono l'alluminio e il rame. I test prevedono l'utilizzo di provini in lega di alluminio 2024 sulla cui superficie venivano incollate le placchette metalliche (Figura 2.4); il collegamento tra i provini e gli estensimetri era realizzato con adesivi di tipico impiego aeronautico utilizzati in Agusta. I test consistevano in prove di trazione a fatica condotte a diversi carichi e a diverse frequenze. I test sono stati condotti con estensimetri in rame ed in alluminio incollati in provini di materiale diverso, come alluminio o acciaio e con diversi tipi di colle e trattamenti superficiali. I risultati ottenuti con estensimetri metallici hanno messo in evidenza in molti casi errori sistematici dovuti all'eccessiva rigidità degli estensimetri, anche riducendo il loro spessore a 0.25mm. In pratica la deformazione del provino non era trasferita completamente all'estensimetro a causa di una deformazione della colla.

Il presente lavoro, che prende spunto dal precedente, si è prefisso di testare l'utilizzo di estensimetri in materia plastica, che presentando un modulo di Young decisamente inferiore al rame e all'alluminio, avrebbero permesso alla colla di trasferire meglio la deformazione dal provino all'estensimetro.

2.4 Scelta preliminare del materiale per gli estensimetri infrarossi

Nel caso in cui la colla trasferisca perfettamente la deformazione dal provino all'estensimetro infrarosso si hanno le seguenti relazioni:

$$\delta\varepsilon_{provino} = \frac{\delta\sigma_{10MPa}}{E_{Acciaio}} \quad (2.4a)$$

$$\delta\sigma_{irsg} = E_{irsg} \cdot \delta\varepsilon_{provino} \quad (2.4b)$$

$$\delta T_{irsg} = K_{el} \cdot T0 \cdot \delta\sigma_{irsg} \quad (2.4c)$$

dove δT_{irsg} è l'aumento di temperatura per effetto termoelastico. E' chiaro che utilizzare un materiale con modulo di Young inferiore, diminuisce il suo stato di tensione e quindi la deformazione della colla, ma diminuisce anche il segnale termoelastico da esso generato. L'effetto termoelastico però dipende anche dalla costante termoelastica che è una caratteristica del materiale utilizzato. Si sono ricercate quindi le proprietà di alcuni materiali plastici e del vetro e per ognuna si è ottenuto il valore del segnale termoelastico in mK nell'ipotesi di applicazione dell'estensimetro ad un provino in acciaio sottoposto ad una tensione ciclica di 10 MPa picco-picco. In Tab.2.1 sono riportati i risultati ottenuti.

Dei materiali di Tab.2.1 è stato scartato il vetro, causa del modulo di Young troppo alto. Per quanto riguarda i termoplastici quelli presi in considerazione sono il **PVC** il **PEEK** e il **Veramyd6** (denominato anche **PA6**) dato che gli altri erano difficilmente reperibili. La scelta finale del materiale e dello spessore con cui realizzare gli estensimetri hanno necessitato però di uno studio più approfondito di quello rappresentato da Eq. 2.4a, Eq.2.4b e Eq.2.4c; in particolare si è dovuto studiare il modello fisico del problema in esame e da questo ricavare il relativo modello numerico. I risultati ottenuti dall'analisi alle differenze finite del modello numerico sono serviti per scegliere definitivamente il materiale e lo spessore con cui realizzare gli estensimetri.

IRSGs			
Polivincloruro (PVC)		Polivincloruro extra-C(PVC-C)	
Modulo di Young [Mpa]	3000	Modulo di Young [Mpa]	3500
Coeff. Espansione termica [1/K]	8.00E-05	Coeff. Espansione termica [1/K]	7.00E-05
Densità [Kg/mc]	1430	Densità [Kg/mc]	1550
Calore specifico P cost [J/K/kg]	1255.2	Calore specifico P cost [J/K/kg]	1297
Costante termoelastica K_{el}	4.45698E-11	Costante termoelastica K_{el}	3.48198E-11
$\delta\sigma$ [Pa]	428571.4286	$\delta\sigma$ [Pa]	500000
δT [mK]	-5.50119097	δT [mK]	-5.014052279
Poliarileterochetone (PEEK)		Polietilentereftalato (PET)	
Modulo di Young [Mpa]	3700	Modulo di Young [Mpa]	3100
Coeff. Espansione termica [1/K]	4.70E-05	Coeff. Espansione termica [1/K]	7.00E-05
Densità [Kg/mc]	1290	Densità [Kg/mc]	1380
Calore specifico P cost [J/K/kg]	1340	Calore specifico P cost [J/K/kg]	2217.52
Costante termoelastica K_{el}	2.71896E-11	Costante termoelastica K_{el}	2.28745E-11
$\delta\sigma$ [Pa]	528571.4286	$\delta\sigma$ [Pa]	442857.1429
δT [mK]	-4.139039024	δT [mK]	-2.917477731
Vetro		Nylon Resina Acetalica (Delrin)	
Modulo di Young [Mpa]	73550	Modulo di Young [Mpa]	9500
Coeff. Espansione termica [1/K]	9.00E-06	Coeff. Espansione termica [1/K]	5.00E-05
Densità [Kg/mc]	2500	Densità [Kg/mc]	1410
Calore specifico P cost [J/K/kg]	837.2	Calore specifico P cost [J/k/kg]	1464
Costante termoelastica K_{el}	4.30005E-12	Costante termoelastica K_{el}	2.4222E-11
$\delta\sigma$ [Pa]	10507142.86	$\delta\sigma$ [Pa]	1357142.857
δT [mK]	-13.01219029	δT [mK]	-9.467337685
PEI		Resina Poliammidica Veramyd 6	
Modulo di Young [Mpa]	2900	Modulo di Young [Mpa]	3000
Coeff. Espansione termica [1/K]	5.60E-05	Coeff. Espansione termica [1/K]	0.000085
Densità [Kg/mc]	1270	Densità [Kg/mc]	1340
Calore specifico P cost [J/k/kg]	2000	Calore specifico P cost [J/k/kg]	1700
Costante termoelastica K_{el}	2.20472E-11	Costante termoelastica K_{el}	3.73134E-11
$\delta\sigma$ [Pa]	414285.7143	$\delta\sigma$ [Pa]	428571.4286
δT [mK]	-2.630551181	δT [mK]	-4.60554371

Tabella 2.1: Caratteristiche di alcuni materiali presi in considerazione per la realizzazione degli IRSGs

3

Modello numerico

3.1 Introduzione

Prima di procedere con la scelta del tipo di materiale termoplastico più adatto per la realizzazione degli estensimetri all'infrarosso e per stabilire la dimensione degli stessi si è reso necessario lo studio dell'andamento della temperatura internamente all'estensimetro. Gli obiettivi di questa analisi sono:

1. determinare la frequenza alla quale l'estensimetro si trova nella condizione di adiabaticità anche per effetto degli scambi convettivi e radiativi con l'ambiente.
2. stabilire la temperatura superficiale dell'estensimetro dovuta all'effetto termoelastico;

Nella fase preliminare di scelta del materiale non si è considerato il reale andamento della temperatura che si genera all'interno dell'estensimetro a causa delle condizioni al contorno. E' quindi necessario un modello numerico che, discretizzando il corretto problema fisico-analitico che descrive il fenomeno, fornisca l'effettivo andamento di temperatura interno all'estensimetro. Prima di procedere è utile introdurre il concetto del modulo termico M ; il modulo termico è il rapporto tra il volume di un solido e la sua superficie: minore è tale modulo termico, maggiore è la velocità con la quale questo elemento tende a raffreddarsi a causa dei fenomeni di convezione ed irraggiamento; per un parallelepipedo di altezza s , larghezza b e lunghezza l il modulo termico è:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{\text{volume}}{\text{superficie}} \\
 &= \frac{s \cdot b \cdot l}{2 \cdot (s \cdot b + s \cdot l + b \cdot l)} \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{b} + \frac{1}{l}\right)} \tag{3.1}
 \end{aligned}$$

L'obiettivo principale di questa fase del lavoro è quindi la determinazione di uno spessore tale da avere, anche a basse frequenze di applicazione del carico, una condizione adiabatica.

3.2 Il Modello fisico

L'estensimetro infrarosso è una placchetta in plastica che viene vincolata alla struttura di cui si vuole rilevare la deformazione attraverso l'incollaggio delle due estremità alla struttura stessa Figura 3.1. La struttura sottoposta a carico si deforma e questa deformazione attraverso i punti di incollaggio viene trasmessa all'estensimetro. Questa deformazione imposta genera un carico sull'estensimetro. Questo carico per effetto termoelastico genera una variazione della temperatura proporzionale al carico stesso. La placchetta però, non essendo isolata termicamente dall'ambiente esterno, è sottoposta alle condizioni al contorno di convezione ed irraggiamento che creano un gradiente di temperatura tra la zona centrale compresa nel piano di mezzeria longitudinale della placchetta e la superficie della stessa. Il modello fisico è rappresentabile dall'equazione di Fourier in regime non stazionario che è un'equazione di bilancio energetico [4].

$$\begin{aligned}
 \rho \cdot C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} &= k_{cond} \cdot \nabla^2 T + \dot{q}_{gen} \tag{3.2} \\
 T &= T(x, y, z, t)
 \end{aligned}$$

dove

- C_v è il calore specifico a volume costante;

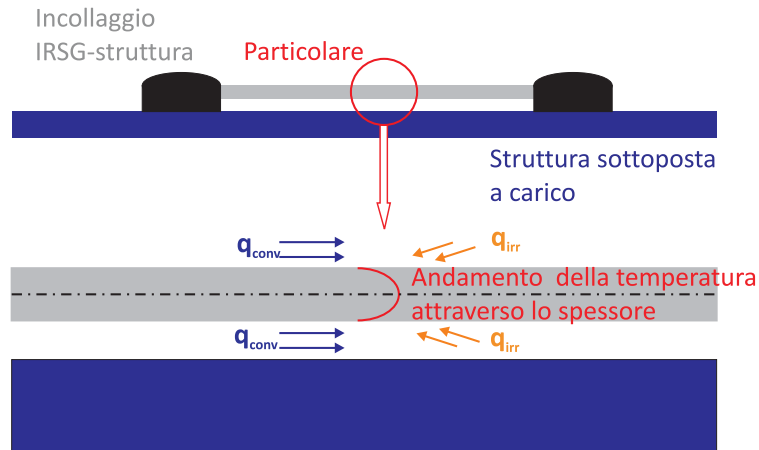


Figura 3.1: Configurazione del problema in esame.

- k_{cond} la conducibilità termica del materiale;
- \dot{q}_{gen} è il termine sorgente termoelastico [5]:

$$\dot{q}_{gen} = -\alpha \cdot T_0 \cdot \frac{\partial I_1^\sigma}{\partial t} \quad (3.3)$$

Nel caso di carico ciclico di ampiezza A , l'Eq.3.3 diventa Eq.3.4

$$\begin{aligned} \dot{q}_{gen} &= -\alpha \cdot T_0 \cdot \frac{\partial I_1^\sigma}{\partial t} \\ &= -\alpha \cdot T_0 \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ I_1^\sigma &= A \sin \omega \cdot t \end{aligned} \quad (3.4)$$

L'Eq.3.5 è la relazione finale che descrive il modello fisico del problema:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \cdot \nabla^2 T - K_{el} \cdot T_0 \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3.5)$$

dove

- χ è la *Diffusività termica*

$$\chi = \frac{k_{cond}}{\rho \cdot C_v} \quad (3.6)$$

- K_{el} è la costante termoelastica del materiale definita in Eq.1.14 grazie alla coincidenza tra C_p e C_v valida nel problema trattato

3.3 Ipotesi e Condizioni al Contorno del problema

Prima di procedere con la discretizzazione numerica del problema fisico di Eq. 3.5 si riportano le ipotesi che meglio descrivono il problema in esame e che permettono di passare dal problema generale al caso specifico riguardante l'impiego degli estensimetri infrarossi.

Come accennato precedentemente, l'obiettivo del modello numerico dell'estensimetro è lo studio della temperatura all'interno dell'estensimetro stesso, in particolare ci interessa conoscere l'andamento della temperatura attraverso lo spessore della placchetta. Dato che lo spessore è una dimensione molto minore rispetto alla lunghezza della placchetta possiamo ricondurci ad un problema di conduzione del calore su parete semi-infinita portando il problema ad essere di fatto un problema di conduzione del calore mono-dimensionale con la temperatura dipendente dalla coordinata spaziale lungo lo spessore x e dalla coordinata temporale t come in Figura 3.2. Un'ulteriore semplificazione deriva dal fatto che il problema presenta condizioni al contorno simmetriche rispetto al piano di mezzeria longitudinale e quindi questo ci permette di studiare l'andamento della temperatura attraverso il solo semispessore anziché lungo lo spessore totale, vedi Figura 3.3. Riassumendo, le ipotesi su cui si basa il modello fisico e da cui si parte per la realizzazione del modello numerico dell'estensimetro infrarosso sono le seguenti:

- Omogeneità ed isotropia del materiale.
- Dipendenza della T dal solo spessore e dal tempo t .
- Simmetria del problema rispetto all'asse di mezzeria.

Grazie a queste ipotesi è stato possibile realizzare il modello numerico 1-D che descrive l'andamento della temperatura lungo lo spessore e che ci permette di calcolare sia la temperatura superficiale e la frequenza alla quale possiamo ritenere il problema in condizioni adiabatiche.

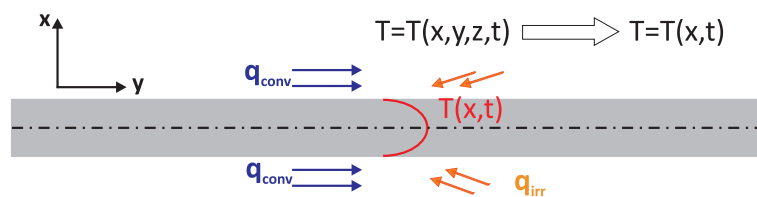


Figura 3.2: Configurazione del problema: condizioni al contorno simmetriche.

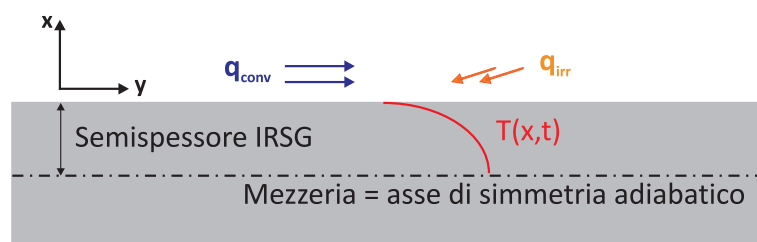


Figura 3.3: Configurazione del problema: andamento della temperatura su parete semi-infinita.

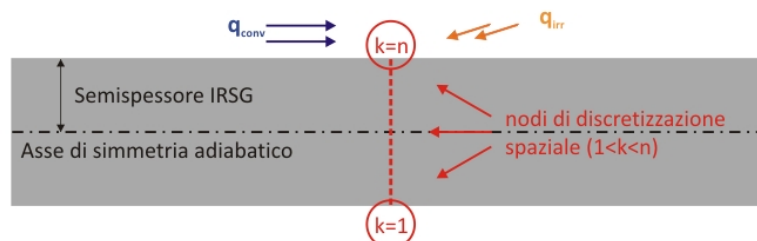


Figura 3.4: Discretizzazione spaziale del semispessore dell'estensimetro.

3.4 Realizzazione del Modello numerico 1-D

Il problema descritto dall'equazione di bilancio (Eq. 3.5) è un problema differenziale non stazionario che può essere integrato con un metodo alle differenze finite. Dato che per le ipotesi sopracitate (Par.3.3) il problema è riconducibile ad un problema di conduzione su parete semi-infinita, l'integrazione nello spazio è realizzata con differenze finite 1-D che discretizzano il semispessore dell'estensimetro come visualizzato in Figura 3.4. Nel modello numerico viene indicato con n il numero di nodi con cui si vuole discretizzare il semispessore mentre j e k ($1 < k < n$) sono rispettivamente l'indice temporale e l'indice spaziale. All'Eq.3.5 si dovranno aggiungere le condizioni al contorno di irraggiamento e convezione superficiale (nodo $k = n$ in Figura 3.4) e, trattandosi di un problema simmetrico, la condizione di adiabaticità lungo l'asse di mezzeria dell'estensimetro (nodo $k = 1$ in Figura 3.4).

3.4.1 Discretizzazione dell'Equazione di conduzione nei nodi centrali

L'Eq. 3.5 nei nodi di discretizzazione centrali che vanno da $k = 2$ fino a $k = n - 1$, viene discretizzata come riportato nelle Eq.3.7a, Eq.3.7b e Eq.3.7c ottenendo infine l'Eq. 3.8.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \left(\frac{T_{k+1}^j - 2T_k^j - T_{k-1}^j}{\Delta x^2} \right) \quad (3.7a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \left(\frac{T_k^{j+1} - T_k^j}{\Delta t} \right) \quad (3.7b)$$

$$-\alpha T_0 A \omega \cos(\omega t) \Rightarrow -\alpha T_0 A \omega \cos(\omega(j\Delta t)) \quad (3.7c)$$

$$\rho C_v \left(\frac{T_k^{j+1} - T_k^j}{\Delta t} \right) = k_{cond} \left(\frac{T_{k+1}^j - 2T_k^j - T_{k-1}^j}{\Delta x^2} \right) - \alpha T_0 A \omega \cos(\omega(j\Delta t)) \quad (3.8)$$

3.4.2 Condizioni al contorno sull'asse

Le ipotesi riportate in Par.3.3 permettono di utilizzare il semispessore come dominio di integrazione del nostro problema. Questa semplificazione comporta l'introduzione della condizione al contorno di simmetria adiabatica rispetto l'asse di mezzeria dell'estensimetro per il primo nodo di discretizzazione che coincide con la relazione riportata in Eq. 3.9a [6]. Introducendo Eq. 3.9a nella discretizzazione del laplaciano della temperatura si ottiene la relazione di Eq. 3.9b. Nel primo nodo, l'equazione di conduzione del calore in mezzeria diventa l'Eq. 3.10

$$T_{k-1}^j = T_{k+1}^j \quad (3.9a)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Rightarrow \left(\frac{2T_2^j - 2T_1^j}{\Delta x^2} \right) \quad (3.9b)$$

$$\rho C_v \left(\frac{T_1^{j+1} - T_1^j}{\Delta t} \right) = k_{cond} \left(\frac{2T_2^j - 2T_1^j}{\Delta x^2} \right) - \alpha T_0 A \omega \cos(\omega(j\Delta t)) \quad (3.10)$$

3.4.3 Discretizzazione dell'Equazione di conduzione nel nodo $k = n$

La superficie dell'estensimetro scambia calore con l'ambiente circostante essendo sottoposta a fenomeni convettivi ed irradiani Figura 3.1, di conseguenza nell'equazione di conduzione del calore Eq. 3.5 si devono considerare i contributi del flusso di calore dovuto alla convezione Eq. 3.11a e il flusso di calore dovuto all'irraggiamento Eq. 3.11b.

$$q_{convezione} = h(T_\infty - T_s^j) \quad (3.11a)$$

$$q_{irraggiante} = \sigma(T_\infty^4 - T_s^{j4}) \quad (3.11b)$$

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cond} \nabla^2 T - \alpha T_0 A \omega \cos(\omega t) + h(T_\infty - T_s^j) + \sigma(T_\infty^4 - T_s^{j4}) \quad (3.12)$$

dove:

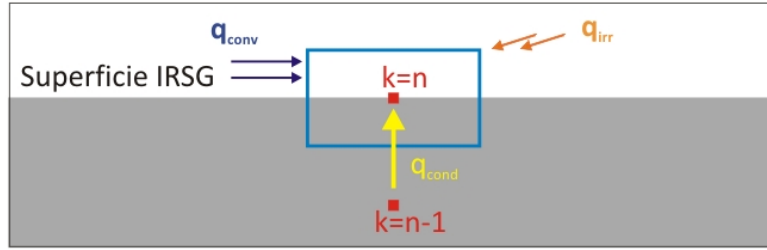


Figura 3.5: Particolare sulla discretizzazione spaziale del semispessore dell'estensimetro.

- h è il coefficiente di convezione termica;
- σ è la costante di *Stefan-Boltzman*;
- T_s è la temperatura superficiale;
- T_∞ è la temperatura all'infinito che è stata considerata pari a quella ambiente;

Dal punto di vista numerico viene applicata la conservazione dell'energia ad un volume di controllo $\Delta V = \Delta x S$ (dove Δx è il passo di discretizzazione spaziale e S la superficie) nel nodo $k = n$ che è l'ultimo nodo e si interfaccia con l'ambiente esterno come visualizzato in Figura 3.5. L'equazione discretizzata diventa quindi Eq. 3.13a e, dividendo per l'area si ottiene Eq.3.13b.

$$\rho C_v \left(\frac{T_n^{j+1} - T_n^j}{\Delta t} \right) \frac{(\Delta x S)}{2} = k_{cond} \left(\frac{T_{n-1}^j - T_n^j}{\Delta x^2} \right) (\Delta x S) - \alpha T_0 A \omega \cos(\omega(j\Delta t)) \frac{(\Delta x S)}{2} + hS(T_\infty - T_n^j) + \sigma S(T_\infty^4 - T_n^{j4}) \quad (3.13a)$$

$$\rho C_v \left(\frac{T_n^{j+1} - T_n^j}{\Delta t} \right) \frac{\Delta x}{2} = k_{cond} \left(\frac{T_{n-1}^j - T_n^j}{\Delta x} \right) - \alpha T_0 A \omega \cos(\omega(j\Delta t)) \frac{\Delta x}{2} + h(T_\infty - T_n^j) + \sigma(T_\infty^4 - T_n^{j4}) \quad (3.13b)$$

3.5 Risultati

Il metodo di integrazione utilizzato è il metodo di *Eulero implicito* che risolve un'equazione differenziale facendo un'approssimazione della derivata con le differenze finite all'indietro. E' un metodo del prim'ordine ma garantisce più stabilità dell'analogo metodo esplicito e si è quindi preferito utilizzare questo tipo di integrazione per l'analisi del problema di conduzione. Per l'implementazione delle differenze finite si è utilizzato il linguaggio *MATLAB* [7].

3.5.1 Calcolo dello spessore degli estensimetri

Grazie ai risultati del modello numerico implementato è possibile conoscere la distribuzione di temperatura lungo lo spessore e quindi determinare la differenza di temperatura tra la superficie e il centro dell'estensimetro come visualizzato in Figura 3.6. Come anticipato, questa differenza di temperatura causa la condizione di non adiabaticità del sistema. Tale differenza di temperatura tende a diminuire con l'aumentare della frequenza di carico portando il sistema di fatto, ad una condizione adiabatica. Nel raggiungimento di questa condizione, oltre alla frequenza risulta importante anche la geometria della placchetta leggasi Modulo termico (vedi Par.3.1) e quindi, in definitiva, dello spessore dell'estensimetro infrarosso. Lo spessore dell'estensimetro influisce sulla frequenza alla quale possiamo ritenere il sistema adiabatico. C'è quindi la necessità di capire come varia la condizione di adiabaticità in funzione della frequenza e dello spessore della placchetta attraverso l'implementazione del modello alle differenze finite. All'atto pratico si è scelto come condizione adiabatica una differenza di temperatura tra la superficie e la mezzeria minore della capacità di risoluzione della termocamera, quindi inferiore al millesimo di Kelvin. La curva di Figura 3.7, è una curva parametrizzata in frequenza e spessore, e fornisce per uno spessore dato la frequenza di carico alla quale siamo in condizioni adiabatiche o alternativamente per una frequenza data lo spessore che fornisce la condizione di adiabaticità. Il calcolo numerico è implementato utilizzando le proprietà del PVC, del Veramyd6 (o PA6) e del PEEK ovvero i materiali selezionati nella fase preliminare del lavoro (vedi Par. 2.4). Il risultato di Figura 3.7 si riferisce al PVC, la curva di Figura 3.8 si riferisce al PA6 mentre in

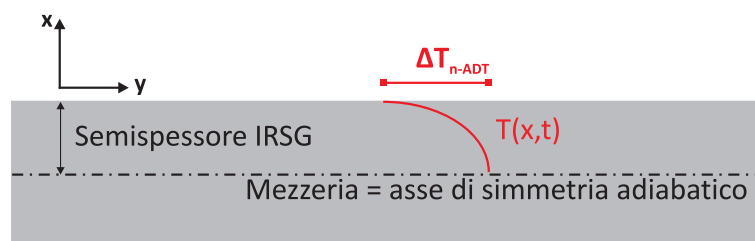


Figura 3.6: Differenza di temperatura tra la superficie e il centro dell'estensimetro.

Figura 3.9 la curva si riferisce al PEEK. Si nota subito come tutti e tre i materiali manifestino lo stesso comportamento e questo è dovuto al fatto che i tre materiali termoplastici sono molto simili dal punto di vista delle caratteristiche fisiche e meccaniche (vedi Tab.2.1). Per tutti e tre i materiali il semispessore di 0.5 mm garantisce una frequenza di adiabaticità inferiore ad 1 Hz ed è quindi stato scelto lo spessore di 1 mm per la realizzazione delle placchette estensimetriche. Le prove però hanno previsto l'utilizzo del solo PA6 e PVC dato che lo spessore minimo fornibile del PEEK era di 8 mm. L'utilizzo di placchette con 8 mm di spessore avrebbe conferito agli estensimetri infrarossi una sezione trasversale rilevante. Un aumento rilevante della sezione va a discapito del buon funzionamento dell'estensimetro che diventa così troppo resistente rispetto all'adesivo incorrendo così nelle problematiche che avevano contraddistinto i precedenti estensimetri in alluminio e rame.

3.5.2 Calcolo della temperatura attraverso lo spessore dell'estensimetro

Determinato lo spessore per la realizzazione degli estensimetri è in PVC e PA6, è possibile ricavare i seguenti risultati:

- la temperatura lungo lo spessore (Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.13 e Figura 3.14);
- il *delta termico* tra mezzeria e superficie dell'estensimetro in funzione della frequenza (Figura 3.12 e Figura 3.15)

I risultati riportati si riferiscono a due livelli di carico, 1 MPa e 3 MPa che sono rispettivamente il carico più basso e il più alto a

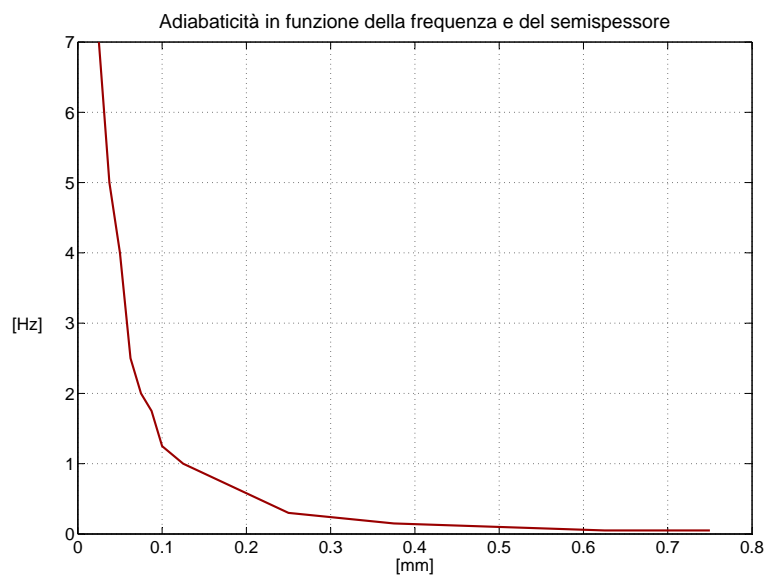


Figura 3.7: Curva di adiabaticità, frequenza-spessore per PVC.

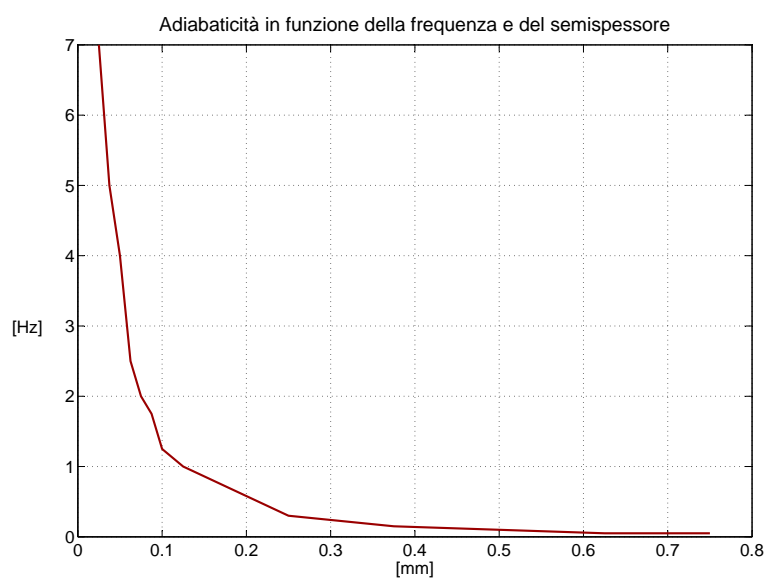


Figura 3.8: Curva di adiabaticità, frequenza-spessore per PA6.

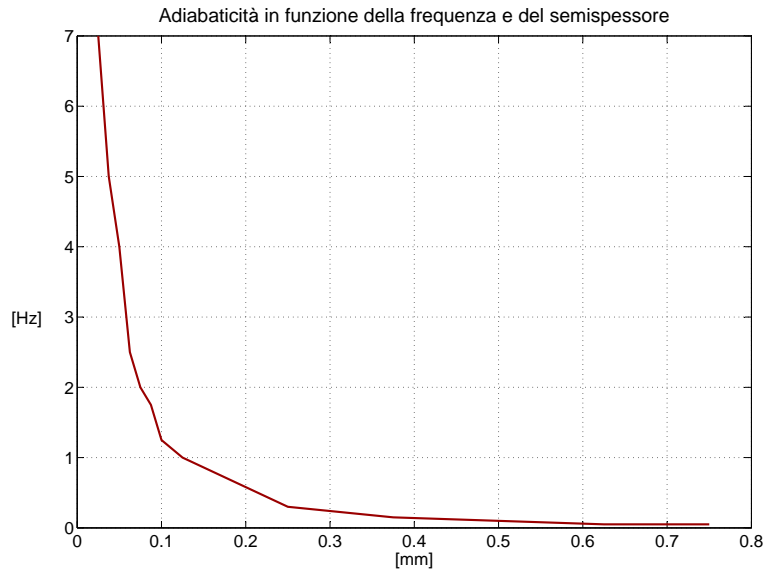


Figura 3.9: Particolare sulla curva di adiabaticità, frequenza-spessore per il PEEK.

cui gli estensimetri sono sottoposti durante il loro impiego nelle prove sperimentali. La frequenza di applicazione di entrambe i carichi è di 1 Hz e si può verificare che in entrambi i casi la differenza di temperatura tra superficie e mezzeria dell'estensimetro si mantiene entro il limite che definisce la condizione di adiabaticità fissata. Questa ulteriore analisi preliminare ha confermato la scelta dei due materiali nella realizzazione degli estensimetri all'infrarosso.

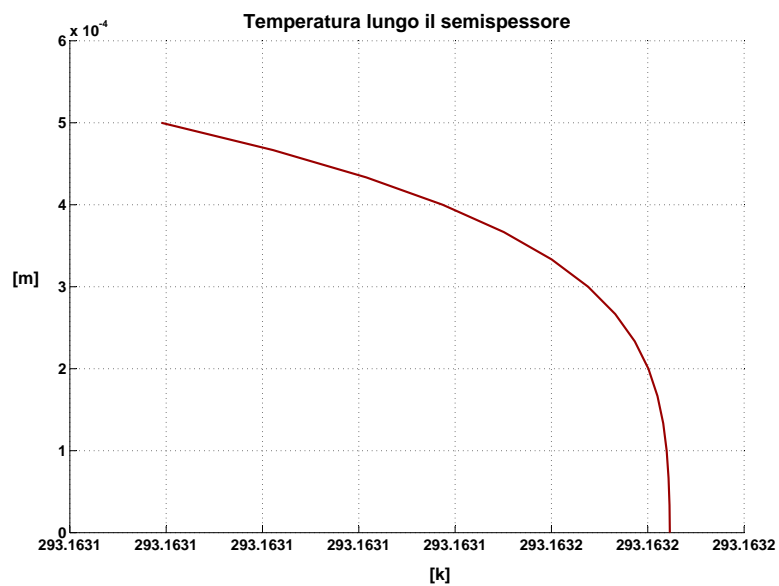


Figura 3.10: Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PVC sottoposto a 1.4 MPa.

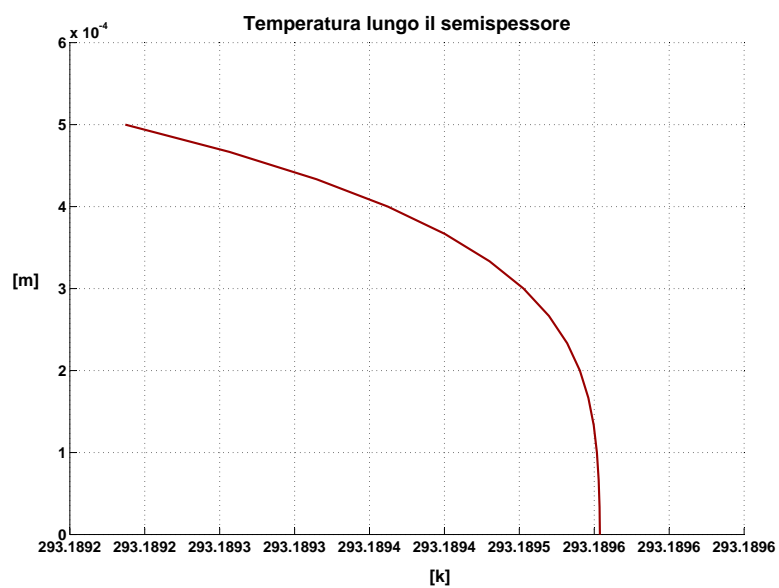


Figura 3.11: Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PVC sottoposto a 3 MPa.

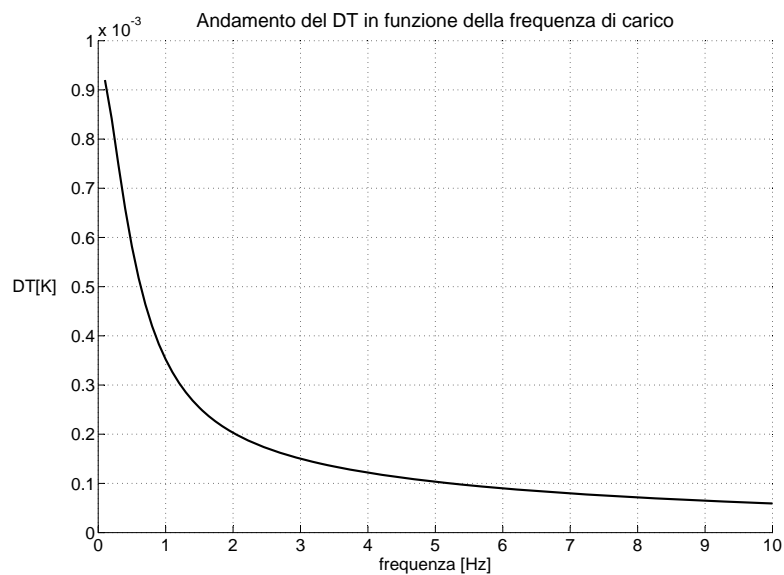


Figura 3.12: Andamento della differenza di temperatura tra mezzeria e superficie in funzione della frequenza per un estensimetro in PVC sottoposto a 3 MPa.

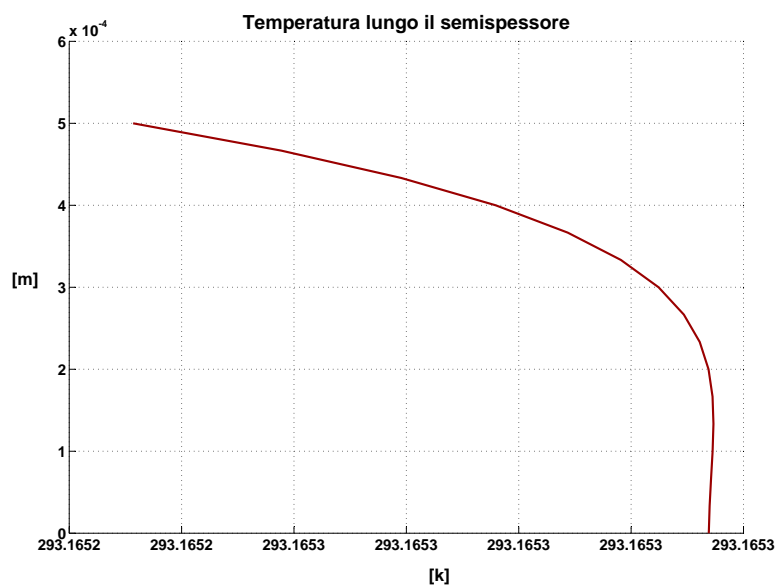


Figura 3.13: Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PA6 sottoposto a 1.4 MPa.

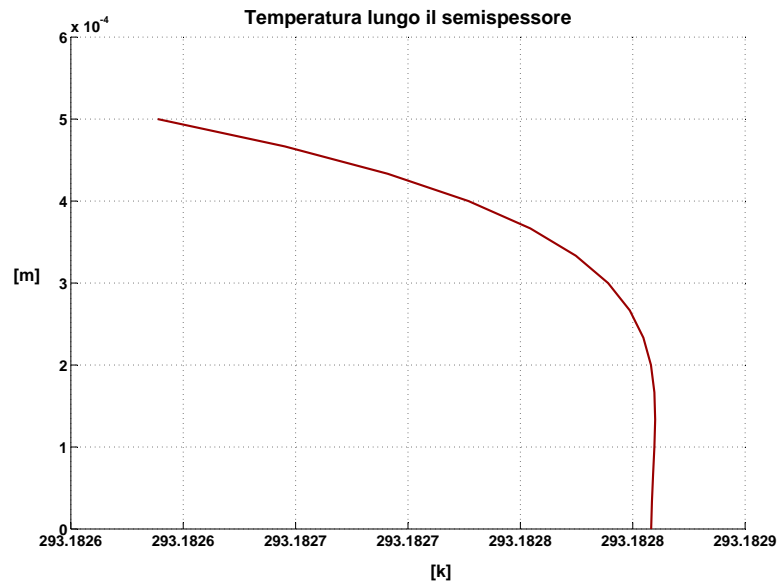


Figura 3.14: Andamento della temperatura lungo il semispessore per un estensimetro in PA6 sottoposto a 3 MPa.

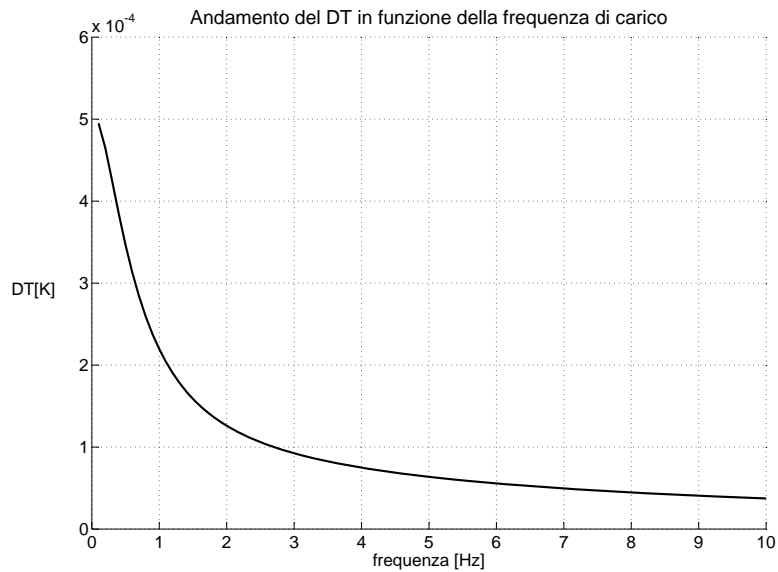


Figura 3.15: Andamento della differenza di temperatura tra mezzeria e superficie in funzione della frequenza per un estensimetro in PA6 sottoposto a 3 MPa.

4

Calibrazione della costante termoelastica

4.1 Introduzione

La relazione termoelastica fondamentale lega la variazione di temperatura allo sforzo applicato attraverso la costante termoelastica del materiale K_0 definita in Eq.1.14. Conoscendo quindi la costante termoelastica del materiale K_0 e la temperatura di riferimento T_0 si riesce a risalire allo sforzo applicato. Prima di procedere con la realizzazione e messa in opera degli estensimetri in PVC e PA6, si sono rese necessarie le determinazioni sperimentali delle relative costanti termoelastiche. La calibrazione viene fatta utilizzando dei provini dello stesso materiale con cui sono realizzati gli estensimetri e quindi nel nostro caso su un provino in PVC e in PA6. La prova di calibrazione si svolge imponendo un carico, e quindi una variazione di sforzo $\Delta\sigma$, e misurando la relativa variazione di temperatura ΔT ottenuta per effetto termoelastico: ripetendo questa procedura per più punti si riesce a costruire la retta di calibrazione del materiale.

4.2 Modalità di prova

L'attrezzatura utilizzata nelle prove di calibrazione consiste in:

- **Macchina di trazione:** la macchina utilizzata è una *Instron Model 1331* con cella di carico massima di 25000 N nominali e sistema di afferraggio idraulico *MTS 647*. E' in grado di applicare carichi dinamici a frequenze massime di 20 Hz. Il controllo della macchina e dei carichi applicati avviene tramite un software dedicato.

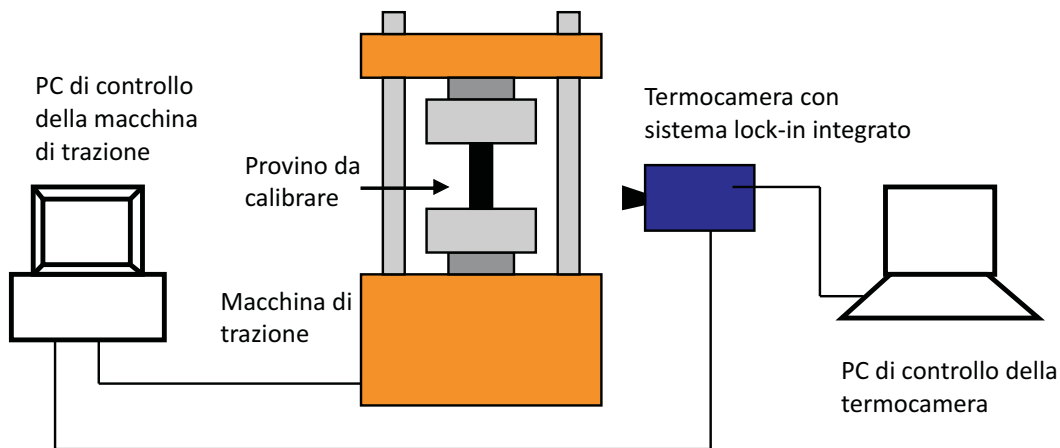


Figura 4.1: Schema della prova di calibrazione

- **Termocamera Cedip Titanium**
- **PC portatile:** la termocamera è gestita da un software di controllo installato in un PC dedicato, questo serve sia per il controllo della termocamera che per l'analisi termografica degli sforzi.
- **provino di materiale plastico** (PVC e PA6) di dimensioni 30 mm × 40 mm × 400 mm

Il provino prima di essere installato subisce un trattamento di opacizzazione della faccia che viene inquadrata dalla termocamera per l'acquisizione del segnale termografico Fig. 4.2. Questo accorgimento serve a far in modo che la superficie non sia riflettente evitando così di alterare l'immagine termografica. Questo trattamento viene fatto carteggiando con carta vetro la superficie interessata. La carta-vetro usata è di tipo a grana fine P320. Durante il carteggio, tra la carta-vetro e la superficie del provino si interpone un sottile strato d'acqua. Alla fine del trattamento la superficie viene pulita con dell'alcool in modo da eliminare eventuali residui di plastica dovuti allo sfregamento. A questo punto il provino può essere installato sulla macchina di trazione pronto per essere caricato.

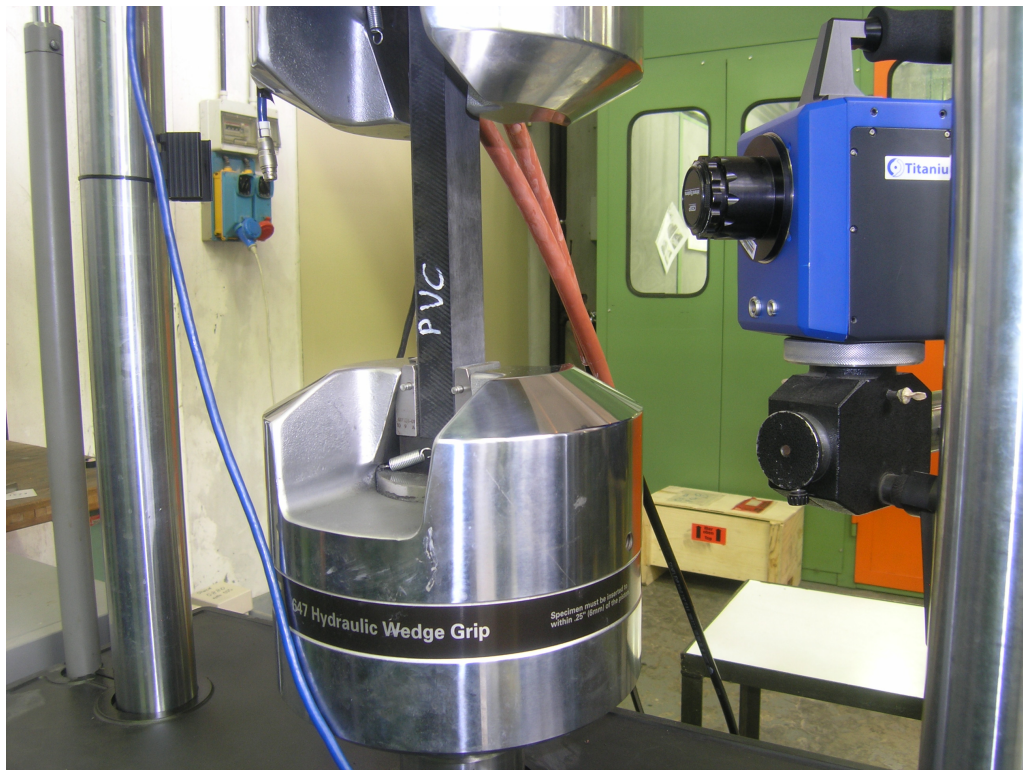


Figura 4.2: Installazione del provino sulla macchina di prova

4.3 Determinazione dei carichi di calibrazione

L'analisi termoelastica può essere effettuata solo in presenza di sforzi applicati in maniera dinamica (Fig. 4.3), e quindi, a differenza dell'estensimetria resistiva in cui il carico può essere statico, l'estensimetria infrarossa viene svolta con carichi sinusoidali che variano nel tempo. Il carico che genera l'effetto termoelastico è dato quindi dal valore picco-picco della componente dinamica indipendentemente dal carico statico presente.

$$F = F_{statico} + F_{dinamico} \cdot \sin(\omega t) \quad (4.1a)$$

$$F_{carico} = 2 \cdot F_{dinamico} \quad (4.1b)$$

Per scegliere i carichi con cui effettuare la calibrazione è stato considerato il range di sforzi dovuti a deformazione imposta in cui si trovano ad operare gli estensimetri infrarossi (Cap. 5). Durante le prove sperimentali il provino in alluminio è sottoposto ad un range di sforzi che va da 30 MPa a 80 MPa che corrispondono per deformazione imposta ad un range di sforzi sugli estensimetri che va da

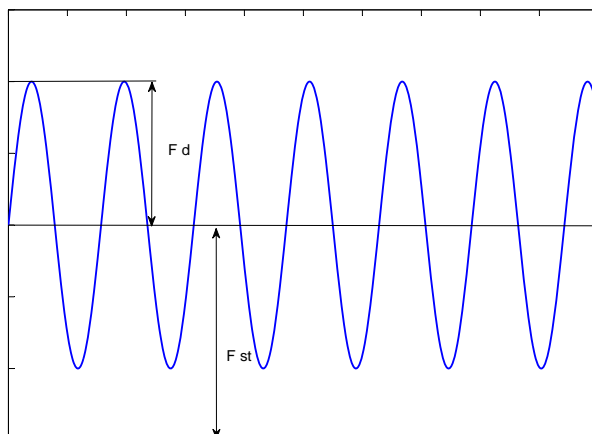


Figura 4.3: Tipologia di sforzo applicato nella TSA

circa 1.4 MPa a circa 3.5 MPa e quindi risulta corretto effettuare le prove di calibrazione utilizzando dei livelli di carico che conferiscono al provino dei livelli di sforzo interni a questo intervallo. Fare le prove all'interno di questo range di sforzi ha assicurato inoltre un comportamento elastico del materiale dato che lo sforzo di snervamento è di 58 MPa per il PVC utilizzato e circa 60 MPa per il PA6 e quindi ben all'interno della zona lineare della curva sforzo-deformazione σ - ε .

Per le prove di calibrazione si è utilizzata una macchina di trazione in cui il livello di carico fornito è proporzionale al segnale in Volt che entra nel sistema *lock-in* della termocamera per la sincronizzazione. Se il carico che la macchina fornisce al provino è troppo basso (rispetto al proprio fondo-scala) è basso anche il livello di tensione corrispondente. Se questo segnale va al di sotto di un certo tensione (circa 1 Volt), il sistema *lock-in* e quindi la termocamera non riesce a sincronizzarsi con la frequenza di applicazione del carico. Per tale motivo, il primo livello di sforzo utilizzato per la calibrazione della costante termoelastica del PVC e del PA6 non è stato 0.4 MPa: per conferire 0.4 MPa al provino, la macchina di trazione deve utilizzare un livello di carico e quindi di tensione troppo basso per il sistema di sincronizzazione *lock-in*. Per tale motivo il livello di sforzo più basso utilizzato per la calibrazione è di 1.4 MPa, mentre come valore massimo si sono mantenuti i 3.5 MPa. Noti i livelli di sforzo entro cui svolgere la calibrazione, viene scelta sia la sezione trasversale del provino (4.2) che il livelli di carico dinamico

Dinamico [N]	Frequenza [Hz]	Sforzo [MPa]
825	1, 5 e 10	1.38
1100		1.83
1375		2.29
1650		2.75
1925		3.21
2200		3.67

Tabella 4.1: Carichi e frequenze di prova utilizzati durante le calibrazioni dei materiali

da impostare nella macchina di trazione (4.1b). La sezione del provino scelta ha le dimensioni 30 mm × 40 mm e quindi un'area pari a 1200 mm².

$$F_{carico} = \sigma \cdot A_{sez} \quad (4.2)$$

La calibrazione si è svolta su sei livelli di carico tali da riprodurre sul provino sei livelli di sforzo partendo da 1.38 MPa incrementando di 0.4 MPa arrivando a 3.6 MPa come mostrato in Tab.4.1. Per ogni livello il carico è stato effettuato con 3 frequenze (1 Hz, 5 Hz e 10 Hz) per verificare se l'analisi termoelastica dipende dalla frequenza di prova.

4.4 Risultati della calibrazione

La costante di calibrazione del materiale è ottenuta a partire dalla pendenza della retta del grafico $\Delta\sigma$ - ΔT . Nell'equazione (1.15) il termine $(K_{el}T_0)$ é la pendenza della retta di calibrazione. Dividendo questo termine per T_0 ottengo la costante di calibrazione del materiale K_{el} .

4.4.1 Risultati della calibrazione per il Polivinilcloruro (PVC)

Come accennato nell'introduzione a questo capitolo, la calibrazione si svolge imponendo una variazione di carico e quindi un $\Delta\sigma$ e rilevando il ΔT corrispondente. Per tale motivo si deve verificare che il punto sulla superficie del provino in cui si rileva la temperatura non vada ad influenzare il valore della temperatura stessa. Questo requisito, di fondamentale importanza nella fase di acquisizione, si verifica ac-

quisendo in punti diversi il segnale termico e verificando che questo non vari (Figura 4.4). Per ogni frequenza di applicazione del carico sono stati ricavati i dati di Tab.4.2 ed è stata realizzata la retta di calibrazione corrispondente (Figura 4.5). Il grafico di Figura 4.5 evidenzia una sovrapposizione delle tre curve dimostrando come il segnale termoelastico rilevato, ovvero la temperatura superficiale del provino, non dipende dalla frequenza di applicazione del carico. Questo conferma il risultato ottenuto dal modello numerico e conferma che a questi livelli di tensione gli effetti dissipativi del materiale plastico sono trascurabili. Sulla base di questa verifica si è realizzata la curva di calibrazione indipendente dalla frequenza di carico che è visualizzata in Figura 4.6.

1 Hz							
T_0 media [K]	ΔT media [K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	Pendenza retta [Pa]	Correlazione R^2	K_0 [1/Pa]	
294.420	0.019	825	1375000				
294.920	0.029	1100	1833333				
295.064	0.035	1375	2291667	1.563E-08	0.99	5.293E-11	
295.406	0.041	1650	2750000				
295.415	0.050	1925	3208333				
296.645	0.055	2200	3666667				
5 Hz							
T_0 media [K]	ΔT media [K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	Pendenza retta [Pa]	Correlazione R^2	K_0 [1/Pa]	
294.583	0.020	825	1375000				
294.894	0.026	1100	1833333				
295.145	0.037	1375	2291667	1.701E-08	0.99	5.758E-11	
295.331	0.042	1650	2750000				
295.399	0.050	1925	3208333				
296.758	0.059	2200	3666667				
10 Hz							
T_0 media [K]	ΔT media [K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	Pendenza retta [Pa]	Correlazione R^2	K_0 [1/Pa]	
294.719	0.020	825	1375000				
294.989	0.029	1100	1833333				
295.312	0.035	1375	2291667	1.602E-08	0.99	5.503E-11	
295.396	0.041	1650	2750000				
296.623	0.050	1925	3208333				
296.797	0.059	2200	3666667				

Tabella 4.2: Risultati calibrazione del PVC

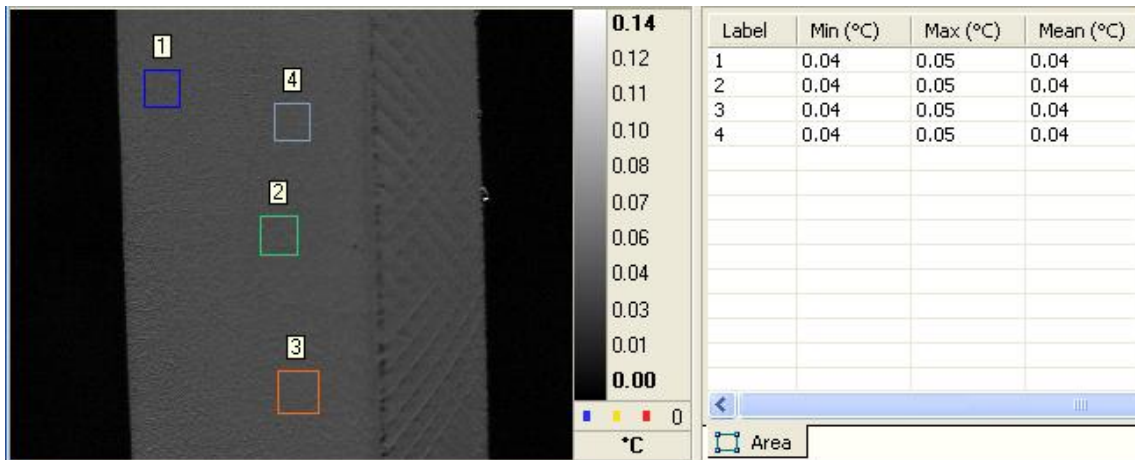


Figura 4.4: Particolare sull'acquisizione dell'immagine termografica per il provino in PVC sottoposto a 1650N di carico dinamico.

4.4.2 Risultati della calibrazione per la resina Poliammidica (PA6)

Utilizzando gli stessi carichi e frequenze di prova del PVC si è realizzata la calibrazione del PA6. Anche in questo caso si è verificata la non dipendenza della temperatura dal punto di rilevazione superficiale (Figura 4.7). In Tab.4.3 i dati con cui si è realizzata la retta di calibrazione e da cui si è ricavata la costante termoelastica del materiale K_{el} . A differenza del PVC, come si può vedere dalla Figura 4.8, non c'è una perfetta sovrapposizione tra le rette di calibrazione corrispondenti alle tre frequenze e per tale motivo non si è realizzata un'unica retta di calibrazione come nel caso precedente.

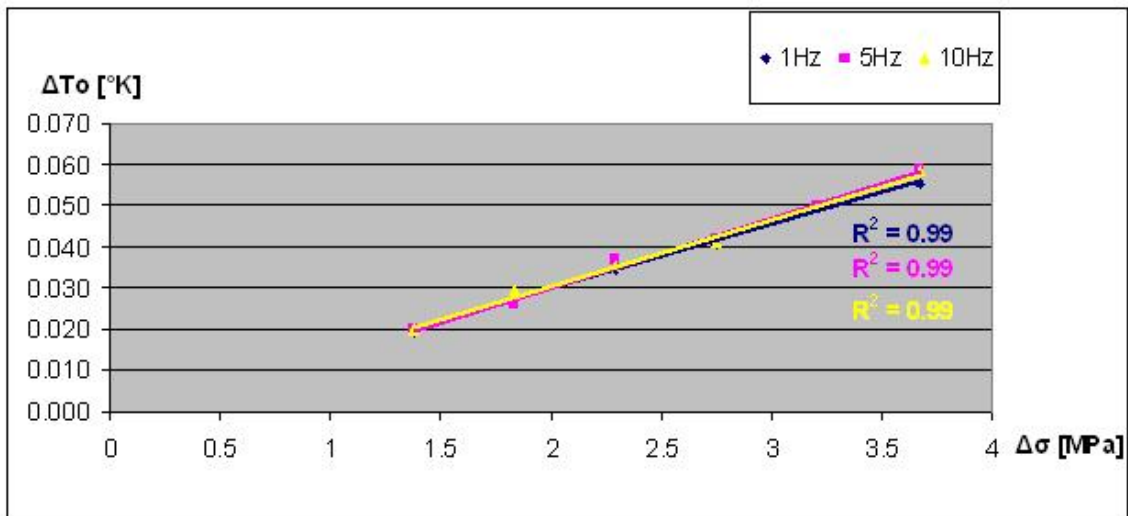


Figura 4.5: Rette di calibrazione per le tre frequenze di prova.

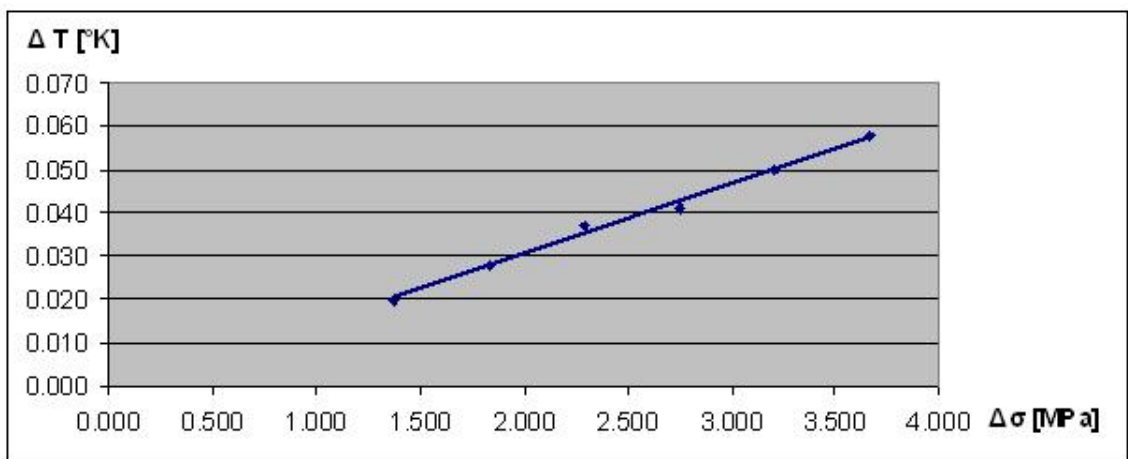


Figura 4.6: Retta di calibrazione.

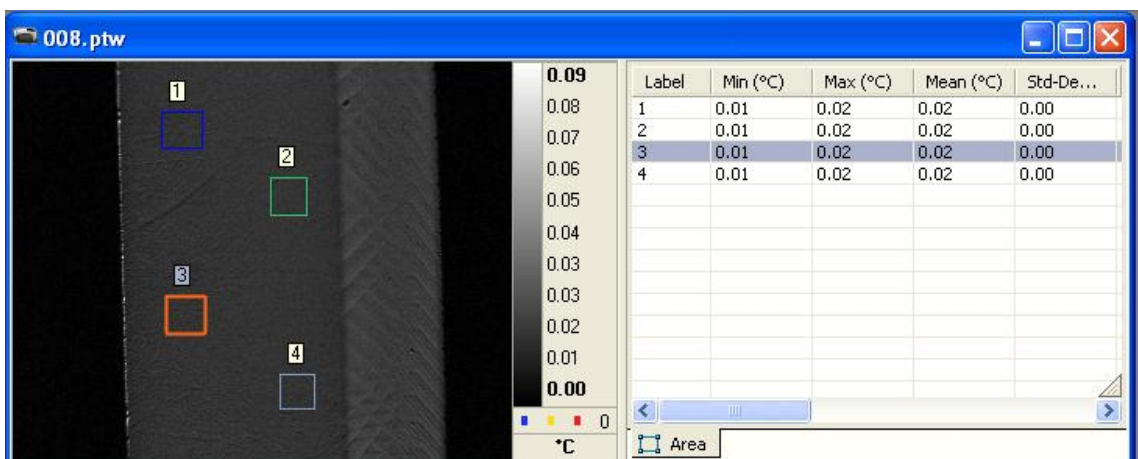


Figura 4.7: Particolare sull'acquisizione dell'immagine termografica per il provino in PA6 sottoposto a 1100N di carico dinamico.

1Hz							
T0 media [°K]	ΔT media [°K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	pendenza retta	Correlazione R^2	K0 [1/Pa]	
296.579	0.015	825	1375000				
296.715	0.016	1100	1833333				
296.515	0.020	1375	2291667	8.306E-09	0.98	2.799E-11	
296.692	0.029	1650	2750000				
296.818	0.030	1925	3208333				
297.088	0.032	2200	3666667				
5Hz							
T0 media [°K]	ΔT media [°K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	pendenza retta	Correlazione R^2	K0 [1/Pa]	
296.608	0.011	825	1375000				
296.590	0.020	1100	1833333				
296.588	0.021	1375	2291667	1.097E-08	0.92	3.698E-11	
296.728	0.029	1650	2750000				
296.885	0.030	1925	3208333				
297.045	0.038	2200	3666667				
10Hz							
T0 media [°K]	ΔT media [°K]	Carico dinamico [N]	$\Delta\sigma$ imposto [Pa]	pendenza retta	Correlazione R^2	K0 [1/Pa]	
296.600	0.013	825	1375000				
296.709	0.020	1100	1833333				
296.600	0.024	1375	2291667	1.091E-08	0.96	3.676E-11	
296.814	0.030	1650	2750000				
296.963	0.032	1925	3208333				
296.959	0.039	2200	3666667				

Tabella 4.3: Risultati calibrazione del PA6

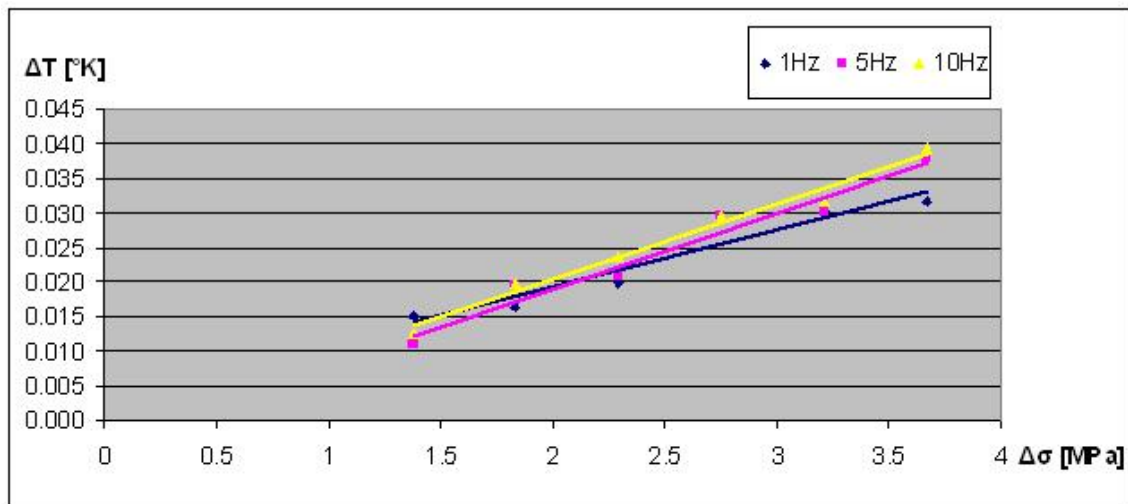


Figura 4.8: Rette di calibrazione per le tre frequenze di prova del PA6.

5

Primo test su provino in lega di Alluminio

5.1 Introduzione

Il primo test sugli estensimetri in materiale termoplastico è stato effettuato su un provino di alluminio 7075T6 che è un materiale tipicamente utilizzato nelle strutture aeronautiche. Il provino è stato posizionato in una macchina di trazione per prove a fatica in grado di generare un carico ciclico. Gli estensimetri all'infrarosso *IRSG* sono stati disposti parallelamente all'asse di applicazione del carico.

Dovendo testare anche l'influenza dell'incollaggio sulla risposta del segnale si è scelto di provare 4 tipi di adesivi diversi.

Quindi riassumendo i punti che caratterizzano le prove sono:

- *IRSG* realizzati con materiale termoplastico dal modulo di Young di 3000 MPa. I materiali scelti sono il PVC e il PA6;
- spessore degli *IRSG* pari ad 1 mm;
- carichi dinamici a legge sinusoidale a tre diverse frequenze di prova;
- intervallo di sforzo tra un carico di prova e l'altro pari a 10 MPa su provino in Alluminio corrispondente a 0.4 MPa sugli estensimetri in plastica;
- incollaggio tra estensimetri infrarossi e provino in Alluminio utilizzando 4 adesivi diversi;

5.2 Modalità di prova

Gli *IRSG* sono stati testati con delle prove a fatica. Le prove sono state fatte su 2 provini piatti a sezione costante in alluminio. In ognuno dei due provini sono stati applicati 4 *IRSG* e 1 estensimetro resistivo *SG*; ai 4 *IRSG* corrispondono 4 adesivi diversi. Tutti gli estensimetri, sia quelli resistivi che infrarossi, sono stati incollati parallelamente all'asse di applicazione del carico. L'estensimetro resistivo doveva dare sia la misura di deformazione che il segnale di ingresso al sistema *lock-in* della termocamera e questo perchè il segnale in uscita dall'estensimetro è sicuramente più vicino alla reale applicazione del carico sul provino evitando eventuali incertezze di applicazione dovute alla macchina di trazione.

5.2.1 Adesivi utilizzati

Vengono elencati i quattro tipi di adesivi impiegati, per ognuno viene data una breve descrizione.

Epoxy Plus: è un adesivo bicomponente epossidico rafforzato con gomma ad alta viscosità. E' utilizzato in campo strutturale ed ha un'alta resistenza a fatica. Può incollare metalli, materiale termoplastico e parti strutturali.

RS: è un adesivo bicomponente epossidico: la componente base è epossidica mentre la componente catalizzatore è un addotto amminico. E' un adesivo ad alte prestazioni che ne permettono l'utilizzo in superficie cementizie, impianti civili, industriali o serbatoi che vengono a contatto con nafte o Kerosene.

AE 10: tale adesivo è costituito da una miscela opportuna di condizionatore (M-prep conditioner A) e di neutralizzatore (M-prep neutralizer SA). Viene impiegato per incollare gli estensimetri resistivi.

Click Bond CB 200: anche questo è un adesivo bicomponente che lega una vasta gamma di tecnopolimeri preparati o impreparati e metalli. Polimerizza velocemente a temperatura ambiente e presenta un'ottima resistenza ambientale e chimica. Il CB200 trova

un grande impiego nell'industria aeronautica potendo sostituire la saldatura, rivettatura e altri metodi di fissaggio meccanici.

5.2.2 Apparecchiatura utilizzata

La scelta dell'apparecchiatura di prova ha dovuto considerare il fatto che le prove svolte hanno utilizzato sia i dispositivi dell'estensimetria classica resistiva che quelli tipici dell'estensimetria infrarossa. Di seguito l'elenco delle apparecchiature utilizzate e la loro funzione nel contesto della prova. In Figura 5.1 la disposizione dell'apparecchiatura durante le prove.

Macchina di trazione: la macchina utilizzata è la stessa descritta in Par.4.2.

Provini in Alluminio 7075T6: i provini utilizzati sono piatti e a sezione rettangolare costante di dimensioni $5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (Figura 5.2).

Estensimetri HBM: le caratteristiche dell'estensimetro sono riportate in Tab.5.6.

MCU: il segnale in uscita dall'estensimetro resistivo passa attraverso l'*MCU*. Questo dispositivo serve sia per bilanciare il ponte di Wheatstone che ad applicare un guadagno al segnale di tensione in uscita dall'estensimetro.

Alimentatore: fornisce la tensione di alimentazione all'*MCU* e all'estensimetro.

Oscilloscopio: il segnale di tensione dell'estensimetro resistivo, dopo l'uscita dall'*MCU*, viene letto da un oscilloscopio. Dal valore picco-picco del segnale sinusoidale riusciamo a risalire alla deformazione fornita dall'estensimetro resistivo.

Voltmetro: prima di iniziare le prove, bisogna portare a zero il valore della tensione in uscita dall'estensimetro e quindi bilanciare il ponte di Wheatstone agendo nell'*MCU*. Il voltmetro ci serve per visualizzare tale valore durante la calibrazione.

Cavi BNC: il collegamento di tutta l'attrezzatura viene fatta attraverso dei cavi BNC.



Figura 5.1: Disposizione dell'apparecchiatura di prova.

Amplificatore del segnale di tensione: a livelli di carico troppo bassi, il segnale di tensione in uscita dall'estensimetro era troppo basso per il sistema di acquisizione *lock-in* e per tale motivo è sorta la necessità di amplificare il segnale prima del suo ingresso nel sistema *lock-in* della termocamera.

Termocamera Cedip Titanium: la termocamera utilizzata è la stessa descritta in Par.4.2

PC portatile: le funzioni del PC dedicato alla termocamera sono descritte in Par.4.2.

5.2.3 Preparazione dei provini in lega di Alluminio 7075T6

In ogni provino sono stati installati un estensimetro resistivo e quattro estensimetri all'infrarosso.

Installazione dell'estensimetro resistivo *SG*

Prima del posizionamento degli estensimetri all'infrarosso è stato posizionato l'estensimetro resistivo (vedi Tab.5.6) e la relativa basetta. Non esiste un collegamento diretto tra estensimetro ed *MCU*: questi

due dispositivi sono interfacciati dalla basetta di collegamento (Figura 5.3). Alla basetta, posizionata in prossimità dell'estensimetro ma spostata verso il bordo del provino, arrivano i fili di rame provenienti dall'estensimetro. Il segnale di tensione viene quindi inviato all'*MCU* con dei fili che dalla basetta si collegano all'*MCU* stesso. Nel punto dove si posiziona l'estensimetro si deve fare un trattamento superficiale che consiste nel passaggio di tela abrasiva in senso circolare facendo attenzione a non creare delle linee preferenziali di sforzo. La fase successiva prevede la pulitura della superficie da eventuali residui di polvere di alluminio con del *Metiletiketone* (o più comunemente *Mek*). Ora sulla superficie può essere posizionato l'estensimetro che viene incollato con dell'adesivo bi-componente *AE-10*. Anche per la basetta si segue lo stesso procedimento. L'estensimetro e la basetta vengono coperti con del nastro isolante *Kapton* durante la fase di polimerizzazione dell'adesivo. Per favorire la polimerizzazione si posizionano dei tamponi di gomma sopra l'area di incollaggio e tramite delle pinze si applica una pressione uniformemente distribuita. Oltre che con l'aumento di pressione si favorisce la polimerizzazione dell'adesivo esponendo l'area in cui è avvenuto l'incollaggio a delle lampade riscaldanti. Dopo 24 ore si possono rimuovere pinze, tamponi e il nastro isolante *Kapton*. A questo punto si possono applicare i fili di rame *130-AWN* che collegano la basetta all'estensimetro come visualizzato in Figura 5.4. L'operazione viene effettuata attraverso il processo di stagnatura con il saldatore a circa 300 – 350 °C. Ora l'estensimetro è pronto e può essere utilizzato. Per proteggere basetta ed estensimetro durante la vita operativa si applica un ricoprente denominato *M-COAT B*.

Installazione degli estensimetri infrarossi *IRSGs*

L'installazione degli estensimetri infrarossi segue un procedimento più semplice e veloce rispetto ai resistivi. Anche in questo caso è stato fatto un trattamento superficiale del provino in alluminio. Per rendere la superficie del provino più ruvida (e quindi favorire l'aggrappaggio dell'adesivo) si è reso necessario l'utilizzo di carta vetro a grana grossa (P60), poi media (P150) e fine (P320). Dopodichè si è pulita la superficie con dell'alcool per eliminare il truciolo formatosi con lo sfregamento. Tutte le placchette, sia di PVC che di PA6, hanno dimensioni

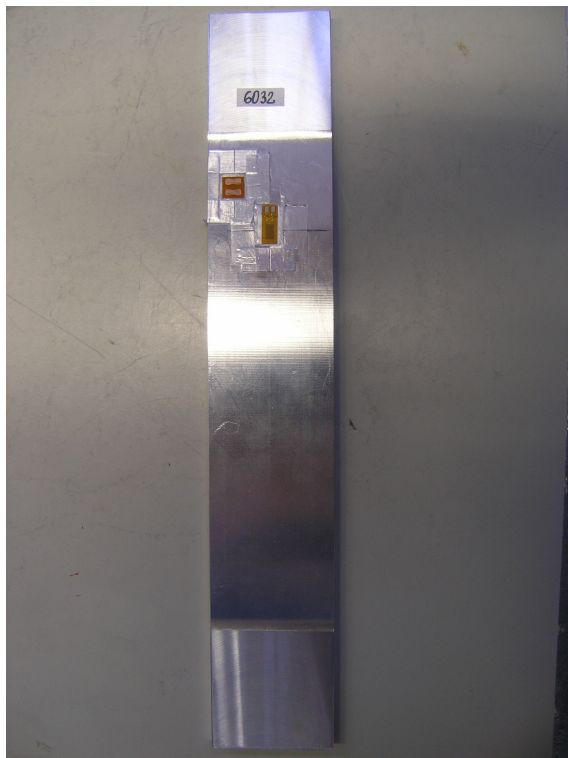


Figura 5.2: Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione.

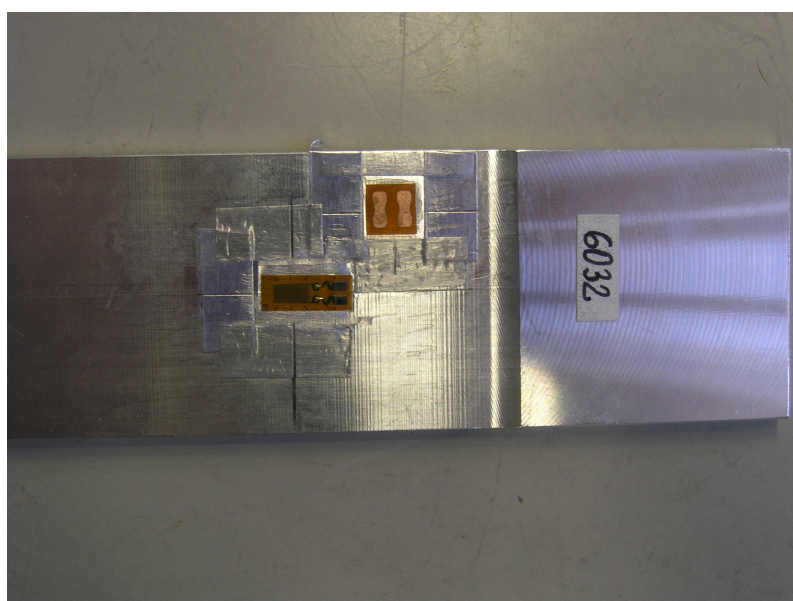


Figura 5.3: Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione dell'estensimetro e della basetta di collegamento.



Figura 5.4: Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione dei cavi di rame tra estensimetro e basetta di collegamento.

1 mm \times 5 mm \times 45 mm . Anche le superfici degli IRSG sono state opacizzate con carta a grana fine mentre nelle zone di estremità preposte all'incollaggio sono stati realizzati dei solchi orizzontali in modo da favorire l'aggrappaggio. A questo punto, l'estensimetro è pronto per essere installato nel provino. In ogni provino di alluminio sono stati applicati 4 IRSG dello stesso materiale ma ognuno incollato con 4 adesivi diversi così da testarne l'influenza.

5.2.4 Scelta dei carichi e delle frequenze di prova

Per applicare la TSA ci deve essere un carico variabile nel tempo, di conseguenza il carico che agisce sul provino in alluminio è dovuto al valore picco-picco della componente dinamica del carico (vedi Eq.4.1a, Eq.4.1b ed Eq.4.2). La componente statica deve essere scelta all'interno di due limiti. Il primo è un limite inferiore: per evitare che il provino vada in compressione durante le prove di trazione la componente statica non deve essere più bassa della componente dinamica massima prevista. Il secondo è un limite superiore: la somma della componente statica e della componente dinamica massima prevista non deve far superare al provino la σ di snervamento.

La scelta del materiale termoplastico comporta, per i motivi citati

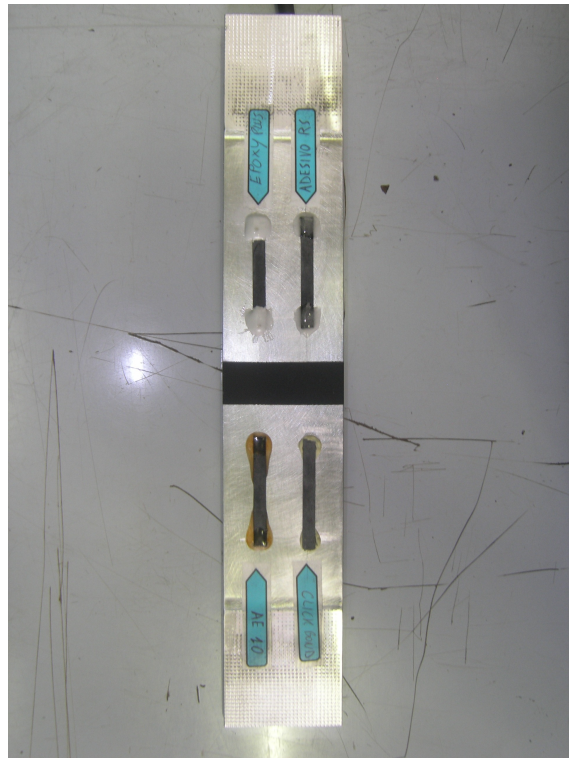


Figura 5.5: Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: particolare sull'installazione degli estensimetri infrarossi.

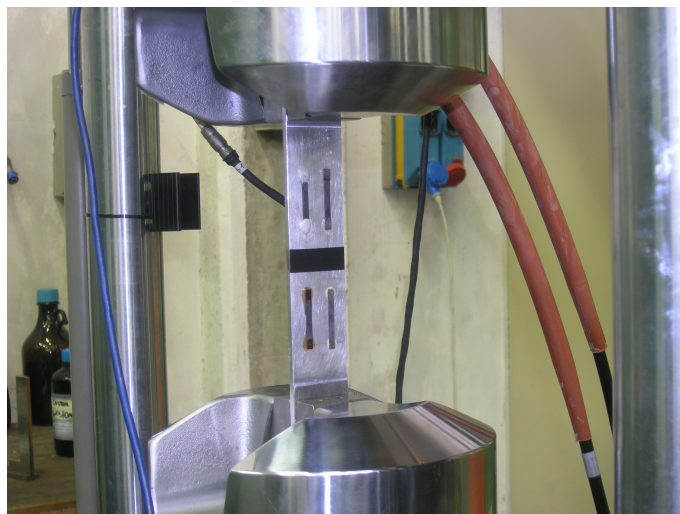


Figura 5.6: Provino in alluminio utilizzato per le prove di trazione: posizionamento degli estensimetri in PVC in asse con la direzione di applicazione del carico.

Sforzo sul provino [MPa]	Dinamico [N]	Frequenza [Hz]	Statico [N]
30	3750	1, 5 e 10	12000
40	5000		
50	6250		
60	7500		
70	8750		
80	10000		

Tabella 5.1: Carichi e frequenze di prova utilizzati durante le prove sugli estensimetri in PA6 e PVC

in Par.5.1, una risoluzione in sforzo applicato su alluminio paria a 10 MPa che corrispondono ad un segnale termico sull'estensimetro pari a circa 5 – 6 mK. Il primo valore di sforzo testato è di 30 MPa su alluminio così da avere un segnale termico più rilevante lasciando ad una seconda sessione di prove la verifica del limite inferiore del carico percepibile dagli *IRSG* termoplastici. Ogni carico di prova è stato applicato a tre frequenze diverse come riportato in Tab.5.1. Le prove sono state eseguite partendo dal carico minore fino al carico maggiore utilizzando per ogni livello di carico tre frequenze di prova diverse: 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz. Lo schema iterativo seguito è:

- scelta del livello carico;
- applicazione della prima frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- applicazione della seconda frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- applicazione della terza frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- cambio del livello di carico;

completato l'intero ciclo fino al carico massimo, si è ripetuto l'intera procedura per tre volte così da ottenere tre misurazioni per ogni combinazione di carico e frequenza di prova e verificare che la storia di carico degli estensimetri non ne modifica le loro proprietà.

5.3 Risultati ottenuti con gli estensimetri in PVC

Da Tab.5.2 a Tab.5.5 sono riportati i risultati ottenuti per i 4 estensimetri realizzati in PVC. Ogni tabella si riferisce ad un diverso adesivo utilizzato. La singola tabella riporta per ogni livello di sforzo e di frequenza di prova le tre misurazioni effettuate. I valori riportati sono il segnale termoelastico rilevato dagli estensimetri infrarossi (riga con ΔT) e l'errore commesso dagli estensimetri infrarossi nella rilevazione della deformazione strutturale (riga con **Err.** [%]). L'errore è stato calcolato rispetto al calcolo analitico-teorico attraverso la relazione

$$Err[\%] = \frac{\Delta\varepsilon_{th} - \Delta\varepsilon_{irs}}{\Delta\varepsilon_{th}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

In ogni tabella sono stati evidenziati in corsivo gli errori sulla deformazione superiori al 10 %. Prima di effettuare delle valutazioni sui risultati ottenuti è utile fare un'osservazione su come è stata acquisita l'immagine termografica durante le prove. Per avere più risoluzione si è preferito avvicinare la termocamera al provino di alluminio. La vicinanza della termocamera però, ha impedito l'acquisizione contemporanea del segnale termico dai quattro estensimetri ma ha permesso l'acquisizione contemporanea di due estensimetri alla volta. Per tale motivo le tre misure sono state ripetute prima per gli estensimetri superiori (denominati 1 e 2 nelle Tab.5.2 e Tab.5.3) e poi per quelli inferiori (denominati 3 e 4 nelle Tab.5.4 e Tab.5.5), di conseguenza eventuali imprecisioni dovute alla macchina di prova sono riscontrabili solamente confrontando le misure tra gli *IRSG* 1 e 2 e tra gli *IRSG* 3 e 4. Aggiungendo a questa considerazione il fatto che nelle applicazioni a carico massimo a 10000 N la macchina era vicina al proprio fondo scala diventando a volte poco precisa, si possono ritenere che i risultati della terza misura ottenuti a 80 MPa a 5 Hz e 10 Hz nel primo estensimetro (ultima riga terza e sesta colonna di Tab.5.2) siano poco attendibili in quanto riscontrabili anche nel secondo estensimetro sempre in corrispondenza della terza misura a 80 MPa a 5 Hz e 10 Hz (ultima riga terza e sesta colonna di Tab.5.3). Scartando questi valori si può concludere che il primo estensimetro (Tab.5.2) è il migliore avendo errori sulla deformazione che non superano il 10 % se non in una sola delle tre misure fatte (a 5 Hz a 70 MPa come riportato in terz'ultima riga prima colonna di Tab.5.2). Gli errori sul-

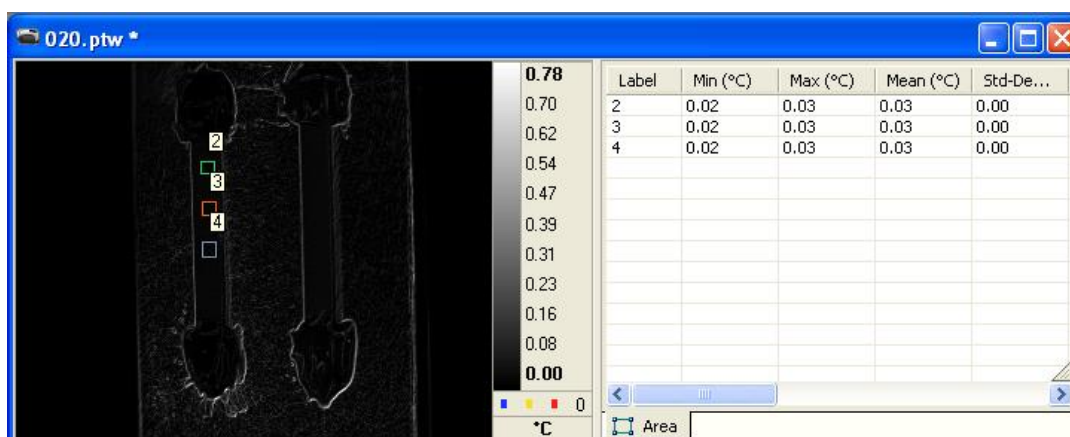


Figura 5.7: Particolare sulle prove svolte con gli estensimetri in PVC: il valore del ΔT acquisito non dipende dal punto di rilevazione sulla superficie dell'estensimetro.

la deformazione riscontrati negli altri estensimetri sono più rilevanti e presenti in più misure soprattutto per gli estensimetri 3 e 4 come riportato in Tab.5.4 e Tab.5.5. L'estensimetro numero 4 è quello che riscontra più errori. Una probabile spiegazione è dovuta al fatto che il tipo di adesivo utilizzato è a polimerizzazione rapida per cui l'applicazione dell'estensimetro è stata meno precisa degli estensimetri 1, 2 e 3. Sulla base di queste considerazioni si è scelto il primo estensimetro, quello incollato con l'adesivo *Epoxy Plus*, per procedere con il confronto tra i risultati ottenuti dall'estensimetria infrarossa e quella resistiva.

IRSG n°1 (Epoxy Plus)	1Hz			5Hz			10Hz		
	1a-mis.	2a-mis.	3a-mis.	1a-mis.	2a-mis.	3a-mis.	1a-mis.	2a-mis.	3a-mis.
30MPa (30.9)	0.019	0.019	0.019	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Err. [%]	1.529	1.404	1.777	9.634	9.400	8.662	2.484	2.232	-
40MPa (41.2)	0.024	0.026	0.024	0.024	0.028	0.027	0.025	0.026	0.027
Err. [%]	5.111	0.149	5.967	5.091	9.450	4.489	4.234	4.731	0.634
50MPa (51.5)	0.030	0.031	0.032	0.030	0.031	0.034	0.032	0.031	0.034
Err. [%]	6.105	4.377	1.835	5.336	4.021	2.659	5.761	8.977	0.841
60MPa (61.8)	0.037	0.040	0.040	0.039	0.040	0.039	0.039	0.040	0.039
Err. [%]	4.331	2.810	2.646	1.217	0.862	2.672	3.399	0.957	3.488
70MPa (72.2)	0.040	0.042	0.047	0.044	0.045	0.046	0.044	0.046	0.046
Err. [%]	11.598	7.921	2.172	6.313	5.353	3.005	6.331	4.594	3.997
80MPa (82.5)	0.050	0.052	0.041	0.051	0.051	0.021	0.050	0.052	0.053
Err. [%]	4.600	0.831	21.863	5.753	6.690	58.401	7.896	4.820	3.456

Tabella 5.2: Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo Epoxy plus

IRSG n°2 (RS)	1Hz			5Hz			10Hz		
	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis
30MPa (30.9)	0.020	0.019	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	-
Err. [%]	6.579	1.387	5.442	9.481	8.406	8.138	5.398	1.802	-
40MPa (41.2)	0.029	0.027	0.026	0.027	0.030	0.029	0.028	0.027	0.029
Err. [%]	13.686	5.706	0.513	6.582	14.394	12.227	5.844	0.434	3.535
50MPa (51.5)	0.030	0.032	0.033	0.033	0.031	0.036	0.034	0.031	0.035
Err. [%]	7.133	0.421	0.133	1.828	3.636	7.347	6.112	6.947	5.761
60MPa (61.8)	0.040	0.042	0.041	0.041	0.040	0.040	0.040	0.041	0.041
Err. [%]	2.645	6.942	5.266	3.987	0.698	0.070	3.611	0.345	3.399
70MPa (72.2)	0.044	0.043	0.049	0.047	0.048	0.048	0.047	0.048	0.048
Err. [%]	2.477	7.165	6.784	0.755	0.571	0.615	4.122	0.593	6.331
80MPa (82.5)	0.052	0.055	0.042	0.053	0.053	0.021	0.050	0.039	0.055
Err. [%]	0.272	4.832	19.367	3.182	3.348	57.659	3.165	27.735	7.896

Tabella 5-3: Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo RS

IRSG n°3 (AE10)	1Hz			5Hz			10Hz		
	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis
30MPa (30.9)	0.029	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.010	0.020
Err. [%]	49.239	8.029	4.933	8.281	8.241	5.497	1.399	47.073	1.085
40MPa (41.2)	0.028	0.027	0.028	0.026	0.032	0.028	0.027	0.028	0.028
Err. [%]	9.434	2.982	6.407	3.601	22.452	7.963	0.575	3.281	2.865
50MPa (51.5)	0.007	0.034	0.033	0.032	0.034	0.034	0.032	0.037	0.035
Err. [%]	75.340	5.563	1.724	1.323	3.521	2.352	4.110	9.110	2.414
60MPa (61.8)	0.038	0.040	0.041	0.058	0.041	0.041	0.040	0.040	0.041
Err. [%]	2.106	2.439	3.220	40.929	1.655	0.844	1.646	0.915	0.298
70MPa (72.2)	0.044	0.046	0.049	0.044	0.049	0.047	0.046	0.047	0.047
Err. [%]	3.832	0.541	4.669	5.516	1.496	1.853	3.941	0.996	2.534
80MPa (82.5)	0.051	0.047	0.041	0.052	0.052	0.056	0.052	0.052	0.090
Err. [%]	1.900	11.243	22.076	4.569	5.790	1.303	4.231	5.113	61.858

Tabella 5.4: Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo AE10

IRSG n°4 (Click Bond)	1Hz			5Hz			10Hz		
	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis	1a-mis	2a-mis	3a-mis
30MPa (30.9)	ΔT [K]	0.026	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.010	0.020
	Err. [%]	37.750	5.207	4.489	8.876	8.252	2.484	48.662	1.078
40MPa (41.2)	ΔT [K]	0.029	0.027	0.030	0.026	0.031	0.027	0.028	0.030
	Err. [%]	13.704	4.516	13.828	3.445	17.960	3.535	1.787	9.060
50MPa (51.5)	ΔT [K]	0.010	0.033	0.032	0.020	0.032	0.030	0.035	0.036
	Err. [%]	66.275	1.490	1.355	34.588	2.735	5.761	3.045	5.639
60MPa (61.8)	ΔT [K]	0.038	0.040	0.040	0.059	0.040	0.040	0.040	0.040
	Err. [%]	2.502	0.941	1.913	43.169	1.373	3.399	3.175	2.343
70MPa (72.2)	ΔT [K]	0.045	0.043	0.050	0.045	0.046	0.045	0.044	0.049
	Err. [%]	2.137	6.741	7.447	3.940	3.352	6.331	7.294	1.917
80MPa (82.5)	ΔT [K]	0.052	0.046	0.041	0.051	0.049	0.051	0.050	0.090
	Err. [%]	0.742	12.480	22.320	5.229	9.639	7.896	9.647	62.614

Tabella 5.5: Errori sulla rilevazione della deformazione del provino ottenuti utilizzando l'estensimetro in PVC incollato con adesivo Click-bond

Tipo	HBM 6/1000LY63S-3
Resistenza	1000 ± 0.30%
Gauge-Factor	2.1 ± 1%
Sensitività trasversale	-0.20%
Materiale compensato termicamente	Alluminio

Tabella 5.6: Caratteristiche degli estensimetri resistivi HBM utilizzati

5.4 Risultati ottenuti con gli estensimetri resistivi

L'accuratezza ottenuta dall'estensimetria resistiva è il parametro di confronto che stabilisce la qualità della misura realizzata dagli estensimetri infrarossi. Anche una tecnologia assodata come l'estensimetria resistiva presenta delle incertezze di misura; tali incertezze sono dovute principalmente a condizioni ambientali che caratterizzano l'ambiente di misura e ad aspetti legati alla realizzazione dell'estensimetro e alla sua messa in opera. Di seguito una descrizione di quali siano gli attori che caratterizzano l'incertezza di misura sulla deformazione di un estensimetro resistivo con caratteristiche riportate in Tab.5.6. I valori di incertezza riportati in percentuale sono stimati conservativamente:

- tolleranza del fattore k $\Rightarrow \pm 1\%$;
- posizionamento sul pezzo $\Rightarrow \pm 0.4\%$;
- supporto/Scorrimento/Isteresi $\Rightarrow < 1\%$;
- variazione di temperatura nell'ambiente di prova \Rightarrow
- incertezza sul valore del Modulo di Young $\Rightarrow \pm 5\%; \pm 1\%$;

i dati sono stati forniti da HBM (Tab.5.6). Non sapendo quale sia il peso di ogni singolo attore nella determinazione dell'incertezza totale, si utilizza la somma pitagorica ($\sigma_{pitagorica}$) per ottenere una stima globale dell'incertezza di misura:

$$\sigma_{pitagorica} = \sqrt{(1^2 + 0.4^2 + 1^2 + 1^2 + 5^2)} = 5.2\% \quad (5.2)$$

Come si può vedere da Tab.5.7 l'incertezza delle misure dell'estensimetro resistivo utilizzato durante le prove è minore dell'incertezza stimata in Eq.5.2. Il valore fornito dall'Eq.5.2 è stimato conservativamente.

Provino Al		SG											
Dinamico [N]	ϵ Th	1Hz					10Hz						
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]
3750	426.503	457.143	449.524	449.524	452.063	2.54	0.56	7.184	5.398	5.398	5.993		
5000	568.671	601.905	609.524	609.524	606.984	2.54	0.42	5.844	7.184	7.184	6.737		
6250	710.838	754.286	754.286	746.667	751.746	2.54	0.34	6.112	6.112	5.040	5.755		
7500	853.006	883.810	906.667	906.667	899.048	7.62	0.85	3.611	6.291	6.291	5.398		
8750	995.173	1036.190	1036.190	1036.190	1036.190	0.00	0.00	4.122	4.122	4.122	4.122		
10000	1137.341	1173.333	1196.190	1196.190	1188.571	7.62	0.64	3.165	5.174	5.174	4.504		
Dinamico [N]	ϵ Th	5Hz					5Hz						
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media		
3750	426.503	449.524	449.524	441.524	446.857	2.67	0.60	5.398	5.398	3.522	4.772		
5000	568.671	601.905	609.524	609.524	606.984	2.54	0.42	5.844	7.184	7.184	6.737		
6250	710.838	754.286	754.286	754.286	754.286	0.00	0.00	6.112	6.112	6.112	6.112		
7500	853.006	883.810	906.667	906.667	899.048	7.62	0.85	3.611	6.291	6.291	5.398		
8750	995.173	1036.190	1036.190	1036.190	1036.190	0.00	0.00	4.122	4.122	4.122	4.122		
10000	1137.341	1173.333	1196.190	1196.190	1188.571	7.62	0.64	3.165	5.174	5.174	4.504		
Dinamico [N]	ϵ Th	10Hz					10Hz						
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media		
3750	426.503	449.524	441.524	-	445.524	3.27	0.73	5.398	5.398	-	5.398		
5000	568.671	601.905	609.524	609.524	606.984	2.54	0.42	5.844	7.184	7.184	6.737		
6250	710.838	754.286	754.286	754.286	754.286	0.00	0.00	6.112	6.112	6.112	6.112		
7500	853.006	883.810	906.667	906.667	899.048	7.62	0.85	3.611	6.291	6.291	5.398		
8750	995.173	1036.190	1036.190	1036.190	1036.190	0.00	0.00	4.122	4.122	4.122	4.122		
10000	1137.341	1173.333	1196.190	1196.190	1188.571	7.62	0.64	3.165	5.174	5.174	4.504		

Tabella 5.7: Risultato ottenuto con l'estensimetro resistivo

5.5 Confronto tra gli estensimetri all'infrarosso in PVC e gli estensimetri resistivi

L'estensimetro denominato come numero 1, incollato con la colla Epoxy Plus, è l'estensimetro che ha dato gli esiti migliori. I risultati ottenuti hanno dimostrato l'indipendenza delle misure dalla frequenza di applicazione del carico. Per tale motivo si prendono in considerazione tutte e nove le misure fatte ad ogni livello di carico così da avere una *popolazione* più ampia su cui poter calcolare la media e l'incertezza statistica (3 misure per ognuna delle 3 frequenze di applicazione del carico, vedi Tab.5.2). La Tab.5.8 riporta nella parte superiore i dati finali riguardanti l'estensimetro infrarosso, mentre nella parte inferiore quelli riguardanti l'estensimetro resistivo. Per entrambe le tipologie di estensimetro sono riportati i valori della media e della deviazione standard della deformazione rilevata ad ogni livello di carico mentre nell'ultima colonna è riportato l'errore percentuale medio. L'errore commesso dall'estensimetro infrarosso nella rilevazione della deformazione è minore dell'errore commesso dall'estensimetro resistivo. Questo vale fino ad uno sforzo sul provino in alluminio pari a 60 MPa, poi a carichi maggiori, 70 MPa e 80 MPa l'errore commesso dall'estensimetro resistivo è leggermente minore.

Gli errori commessi dall'estensimetro infrarosso rimangono comunque molto contenuti e in linea con gli errori commessi dall'estensimetria resistiva, per tale motivo si può concludere che in questo tipo di misure il risultato ottenuto dall'estensimetro in plastica è sicuramente positivo.

A favore dell'estensimetria resistiva c'è sicuramente una minor incertezza nella misura della deformazione rispetto a quella ottenuta con gli estensimetri in plastica che rivelano una maggior dispersione dei dati (sesta colonna di Tab.5.8).

5.6 Risultati ottenuti con gli estensimetri in PA6

I risultati ottenuti con il secondo materiale sono stati molto deludenti. Gli estensimetri in PA6, hanno dato degli errori sulla rilevazione della deformazione molto rilevanti in qualche caso vicine al 100% di

errore. Il procedimento di prova seguito è stato lo stesso delle precedenti riguardanti gli IRSG in PVC ma i risultati ottenuti sono molto scadenti. Dato che dalla prima campagna di misure è stato rilevato da subito il comportamento anomalo di questo materiale non si sono effettuate, a differenza del PVC, le altre due campagne di prove. In Tab.5.9 sono riportati i risultati delle prove effettuate. Per ogni carico e frequenza di prova sono riportati il segnale termico rilevato per effetto termoelastico ΔT , l'errore commesso dall'estensimetro infrarosso in PA6 (**Err.** [%]) e l'errore commesso dall'estensimetro resistivo (**Err.SG** [%]). Entrambe gli errori si riferiscono alla differenza di deformazione rilevata tra l'estensimetro e il calcolo analitico. Già dalle prove di calibrazione riportate in Par.4.4.2, era emerso un comportamento anomalo del PA6 rivelando una probabile dissipazione viscosa. Si può concludere che questo materiale non va bene.

Provino Al			IRSG			
Dinamico [N]	Sforzo [MPa]	Def.Th [$\mu \varepsilon$]	Def.media [$\mu \varepsilon$]			err %
			media	dev.st	dev.st[%]	medio
3750	30.9	426.503	443.91	6.78	1.53	4.64
5000	41.2	568.671	561.90	10.05	1.79	4.43
6250	51.5	710.838	683.52	8.08	1.18	4.43
7500	61.8	853.006	842.13	7.32	0.87	2.49
8750	72.2	995.173	943.27	12.40	1.32	5.70
10000	82.5	1137.341	1082.02	9.87	0.91	4.86
Provino Al			SG			
Dinamico [N]	Sforzo [MPa]	Def.Th [$\mu \varepsilon$]	Def.media [$\mu \varepsilon$]			err %
			media	dev.st	dev.st[%]	medio
3750	30.9	426.503	449.48	1.48	0.33	5.39
5000	41.2	568.671	606.98	1.39	0.23	6.74
6250	51.5	710.838	53.44	0.95	0.13	5.99
7500	61.8	853.006	899.05	4.18	0.47	5.40
8750	72.2	995.173	1036.19	0.00	0.00	4.12
10000	82.5	1137.341	1188.57	4.18	0.35	4.50

Tabella 5.8: Confronto tra estensimetro infrarosso in PVC incollato con *Epoxy Plus* ed estensimetro resistivo

IRSG n°1 (Epoxy Plus)		1Hz	5Hz	10Hz
30MPa (30.9)	ΔT [K]	0.010	0.010	0.011
	Err. [%]	33.206	25.218	21.268
	Err. Sg[%]	-4.504	-4.504	-4.504
40MPa (41.2)	ΔT [K]	0.035	0.038	0.011
	Err. [%]	-98.113	-101.650	40.831
	Err. Sg[%]	-5.844	-5.844	-5.844
50MPa (51.5)	ΔT [K]	0.016	0.017	0.019
	Err. [%]	32.435	27.925	19.943
	Err. Sg[%]	-6.112	-6.112	-6.112
60MPa (61.8)	ΔT [K]	0.048	0.020	0.023
	Err. [%]	-86.455	27.175	18.421
	Err. Sg[%]	-4.058	-4.058	-4.058
70MPa (72.2)	ΔT [K]	0.023	0.024	0.027
	Err. [%]	28.643	26.214	17.981
	Err. Sg[%]	-4.122	-4.122	-4.122
80MPa (82.5)	ΔT [K]	0.030	0.030	0.029
	Err. [%]	15.598	20.048	21.926
	Err. Sg[%]	-1.825	-1.825	-1.825

Tabella 5.9: Risultati per estensimetro in PA6 incollato con adesivo *Epoxy Plus*

6

Secondo test su provino in lega di Alluminio

6.1 Introduzione

L'obiettivo principale di queste prove è stata la ripetibilità della prova, che poteva essere compromessa sia da un cedimento della colla sia da deformazioni plastiche dell'estensimetro infrarosso. I carichi utilizzati sono maggiori rispetto a quelli delle prove descritte in Cap.5. A fronte dei risultati ottenuti nelle precedenti prove, l'estensimetro utilizzato in questi test è in PVC e l'adesivo è l'Epoxy Plus.

6.2 Modalità di prova

Le modalità e le attrezzature di prova non sono variate rispetto a quelle descritte in Par.5.2 anche se in questo caso la macchina di trazione utilizzata per le prove di fatica è stata una *MTS* con cella di carico dinamico massimo di 250000 N.

6.2.1 Scelta dei carichi e delle frequenze di prova

Per testare la capacità dell'adesivo a trasferire meglio le deformazioni anche in presenza di sforzi più alti di quelli utilizzati nelle prove di Cap.5, si è scelto un intervallo di tensioni su alluminio che va da 70 MPa a 240 MPa. In questo caso non si mantiene il $\Delta\sigma$ di 10 MPa come nelle prove precedenti ma si utilizza un intervallo di applicazione variabile. Durante le prove la somma della componente statica e della componente dinamica massima del carico hanno generato nel provino in alluminio lo sforzo massimo di 250 MPa quindi ben al di sotto dello sforzo di snervamento che per la lega 7075 T6 è pari a circa 500 MPa.

Statico [N]	Dinamico [N]	σ provino [Mpa]	σ estensimetro [Mpa]	Frequenza [Hz]
32500	9000	72	3	1,5 e 10
	15000	120	5	
	21250	170	7	
	30000	240	10	

Tabella 6.1: Carichi applicati nelle prove a livelli di sforzo maggiore

Non si è voluto andare oltre con il livello di sforzo applicato sul provino per non oltrepassare il limite di fatica della lega di alluminio 7075T6. Il livello di sforzo massimo raggiunto nell'estensimetro durante le prove è di 10.34 MPa quindi ben al di sotto dello sforzo di snervamento del PVC che è di 58 MPa. Come per le prove di Cap.5 la modalità di prova ha seguito il seguente procedimento:

- scelta del livello carico;
- applicazione della prima frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- applicazione della seconda frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- applicazione della terza frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- cambio del livello di carico.

Completato l'intero ciclo fino al carico massimo, si è ripetuto l'intera procedura per tre volte così da ottenere tre misurazioni per ogni combinazione di carico e frequenza di prova.

6.3 Risultati

Anche a carichi maggiori si conferma il buon comportamento degli estensimetri infrarossi. I risultati ottenuti dall'IRSG sono riportati in Tab.6.2. La tabella riporta nella prima colonna il carico dinamico applicato al provino in alluminio e nella seconda colonna la deformazione teorica corrispondente denominata come $\Delta\varepsilon_{th}$. La terza è una macrocolonna che riporta per ogni frequenza di prova i valori della deformazione $\Delta\varepsilon_{IRSG}$ ottenuti dall'estensimetro in PVC

da ognuna delle tre campagne di misura effettuate assieme alla loro media e deviazione standard della media. La quarta è un'altra macro-colonna che riporta per ogni frequenza di prova i valori degli errori percentuali commessi dall'IRSG rispetto al valore della deformazione teorico-analitica. La Tab.6.3 è analoga a quella appena descritta ma si riferisce ai dati dell'estensimetro resistivo. Confrontando i risultati riportati in Tab.6.2 (*IRSG*) con quelli riportati in Tab.6.3 (*SG*), si evince come gli errori percentuali medi sulla deformazione rilevati dagli estensimetri infrarossi siano in linea con gli errori commessi dagli estensimetri resistivi. Andando poi a confrontare gli errori riportati in Tab.6.2 con quelli delle prove di Cap.5 (vedi Tab.5.8) si evidenzia come il comportamento dell'adesivo e del PVC non sia peggiorato a fronte di un aumento del carico sul provino in alluminio: gli errori percentuali sulla deformazione rilevati con i carichi utilizzati nelle prime prove su alluminio sono compresi tra l'1% e il 5% (Tab.5.8) non discostando di molto dagli errori sulla deformazione ottenuti con carichi maggiori (Tab.6.2) che sono compresi tra l'1% e il 6%. Le prove sono caratterizzate quindi da una buona ripetibilità. Anche in questo caso, l'incertezza di misura ottenuta con gli estensimetri infrarossi è maggiore di quella ottenuta con l'estensimetria resistiva come evidenziato dal confronto tra l'ottava colonna di Tab.6.2 (estensimetria infrarossa) con la rispettiva di Tab.6.3 (estensimetria resistiva).

Dal confronto tra la deformazione ottenuta dalla TSA (analisi termografica degli sforzi) fatta direttamente sul provino in alluminio con la deformazione rilevata dall'estensimetro infrarosso si può risalire all'entità della deformazione assorbita dall'adesivo come riportato negli istogrammi di Fig.6.1, Fig.6.2 e Fig.6.3. Come si può vedere da Fig.6.1 ad 1 Hz l'adesivo trasferisce correttamente la deformazione dal provino all'estensimetro anche agli sforzi massimi. A 5 Hz e 10 Hz si nota invece come la colla assorba parte della deformazione. A 5 Hz e 240 MPa di sforzo è stata rilevata la discrepanza maggiore tra le due deformazioni per un valore pari a $198 \mu\epsilon$ che corrispondono a 14 MPa su un totale di 240 MPa di sforzo applicati sul provino (ovvero il 6% del carico). Questi risultati confermano comunque il buon comportamento dell'adesivo.

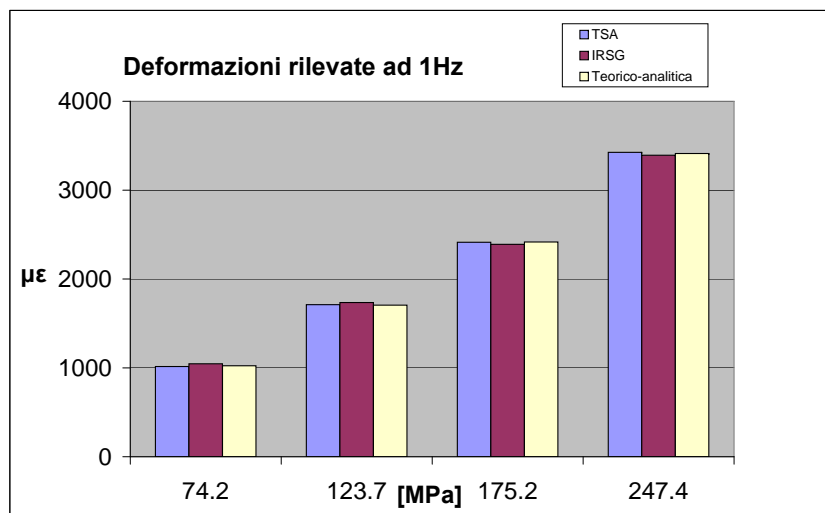


Figura 6.1: Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG ad 1Hz

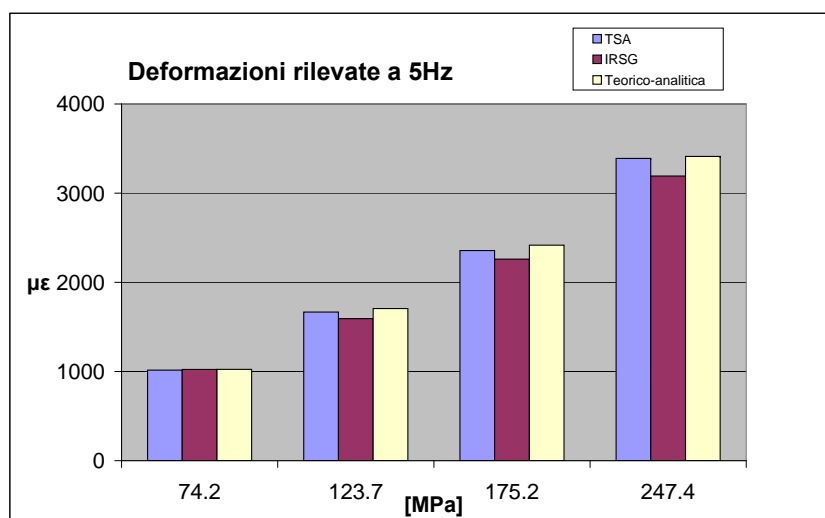


Figura 6.2: Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG a 5Hz

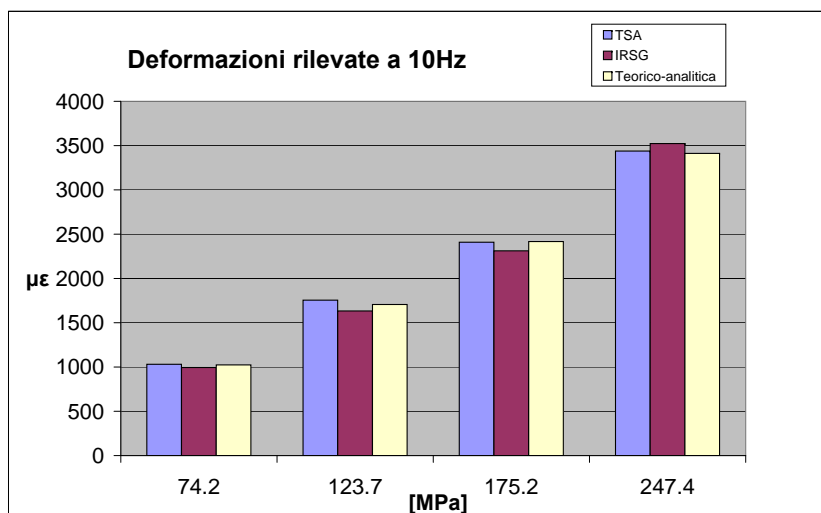


Figura 6.3: Confronto tra la deformazione rilevata dalla TSA e quella rilevata dall'IRSG a 10Hz

Dinamico [N]	$\Delta\varepsilon$ Th	1 Hz					1 Hz				
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media
9000	1023.607	1037.91	1060.58	1038.81	1045.76	7.41	0.71	1.40	3.61	1.49	2.16
15000	1706.012	1762.21	1754.92	1688.57	1735.23	23.43	1.35	3.29	2.87	1.02	2.39
21250	2416.85	2447.42	2410.41	2313.53	2390.45	39.92	1.67	1.26	0.27	4.28	1.94
30000	3412.023	3384.95	3467.85	3327.06	3393.29	40.86	1.20	0.79	1.64	2.49	1.64
Dinamico [N]	$\Delta\varepsilon$ Th	5 Hz					5 Hz				
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media
9000	1023.607	1069.46	1037.87	962.6476	1023.33	31.68	3.10	4.48	1.39	5.96	3.94
15000	1706.012	1594.17	1649.62	1692.435	1671.07	28.45	1.69	6.56	3.31	6.66	5.51
21250	2416.85	2269.49	2183.58	2327.301	2260.13	41.75	1.85	6.10	9.65	3.71	6.48
30000	3412.023	3361.29	3134.63	3079.781	3191.90	86.16	2.70	1.49	8.13	9.74	6.45
Dinamico [N]	$\Delta\varepsilon$ Th	10 Hz					10 Hz				
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media
9000	1023.607	1079.39	979.94	922.92	994.08	45.72	4.60	5.45	4.27	9.84	6.52
15000	1706.012	1311.02	1678.72	1587.29	1525.68	110.52	7.24	4.28	1.60	6.96	4.28
21250	2416.85	2030.87	2478.07	2426.35	2311.76	141.24	6.11	15.97	2.53	0.39	6.30
30000	3412.023	3621.91	3623.90	3323.17	3522.99	99.91	2.84	6.15	6.21	2.60	4.99

Tabella 6.2: Risultati ottenuti con gli estensimetri infrarossi per le misure effettuate a carichi maggiori

Dinamico [N]	$\Delta\epsilon$ Th	1 Hz $\Delta\epsilon$ SG						1 Hz err% SG					
		1 mis.	2 mis.	3 mis.	media	dev.st	dev.st[%]	1 mis.	2 mis.	3 mis.	media		
9000	1023.607	1089.52	1074.2857	1066.667	1076.83	6.72	0.62	6.44	4.95	4.21	5.20		
15000	1706.012	1790.48	1790.4762	1798.095	1793.02	2.54	0.14	4.95	4.95	5.40	5.10		
21250	2416.85	2590.48	2590.4762	2514.286	2565.08	25.40	0.99	7.18	7.18	4.03	6.13		
30000	3412.023	3580.95	3580.9524	3535.238	3565.71	15.24	0.43	4.95	4.95	3.61	4.50		
Dinamico [N]	$\Delta\epsilon$ Th	5 Hz $\Delta\epsilon$ SG						5 Hz err% SG					
9000	1023.607	1089.524	1074.2857	1066.667	1076.83	6.72	0.62	6.44	4.95	4.21	5.20		
15000	1706.012	1790.476	1790.4762	1798.095	1793.02	2.54	0.14	4.95	4.95	5.40	5.10		
21250	2416.85	2590.476	2590.4762	2514.286	2565.08	25.40	0.99	7.18	7.18	4.03	6.13		
30000	3412.023	3580.952	3580.9524	3535.238	3565.71	15.24	0.43	4.95	4.95	3.61	4.50		
Dinamico [N]	$\Delta\epsilon$ Th	10 Hz $\Delta\epsilon$ SG						10 Hz err% SG					
9000	1023.607	1089.524	1074.286	1066.67	1076.83	6.72	0.62	6.44	4.95	4.21	5.20		
15000	1706.012	1790.476	1790.476	1798.10	1793.02	2.54	0.14	4.95	4.95	5.40	5.10		
21250	2416.85	2590.476	2590.476	2514.29	2565.08	25.40	0.99	7.18	7.18	4.03	6.13		
30000	3412.023	3580.952	3580.952	3535.24	3565.71	15.24	0.43	4.95	4.95	3.61	4.50		

Tabella 6.3: Risultati ottenuti con gli estensimetri resistivi per le misure effettuate a carichi maggiori

7

Prove con estensimetri inclinati

7.1 Introduzione

Nelle normali applicazioni sperimentali gli estensimetri resistivi sono utilizzati anche come mezzo per separare le tensioni e quindi sono utilizzabili anche per misurare gli sforzi principali sulla superficie del pezzo. In questo caso si utilizzano più estensimetri andando a costituire la rosetta estensimetrica. In vista di questa probabile applicazione si sono svolte delle ulteriori prove sugli estensimetri infrarossi in presenza di carico non allineato. Mentre nelle precedenti prove gli estensimetri venivano applicati parallelamente all'asse di applicazione del carico, in questi test gli *IRSG* sono stati posizionati in modo da formare un certo angolo con l'asse di applicazione del carico. Inclinando l'estensimetro di un angolo α , la componente di deformazione agente lungo il proprio asse viene diminuita dalla componente generata dalla strizione del provino come visualizzato in Fig.7.1. La componente di deformazione ε_x agente lungo l'asse longitudinale dell'*IRSG* è data dalla somma delle proiezioni delle deformazioni principali a cui è sottoposto il provino ε_A e ε_S : ε_A è la deformazione assiale del provino caricato assialmente e ε_S è la deformazione dovuta alla strizione del provino (Eq.7.1 e Fig.7.1).

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{xA} - \varepsilon_{xF} = \varepsilon_A \cos(\alpha) + \varepsilon_F \cos(\beta) \quad (7.1)$$

L'estensimetro è incollato su un materiale, l'alluminio, che è omogeneo ed isotropo in cui vale la relazione di Eq.7.2 [8].

$$\varepsilon_F = -\nu\varepsilon_A \quad (7.2)$$

Dove ν è il coefficiente di Poisson. L'angolo β è complementare ad α e quindi vale la relazione per cui:

$$\cos\beta = \cos(90 - \alpha) = \sin\alpha \quad (7.3)$$

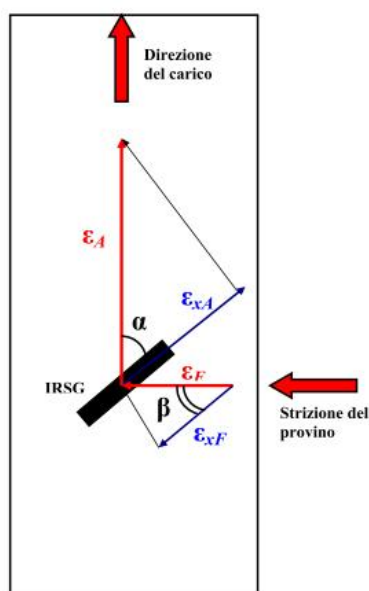


Figura 7.1: Posizionamento dell'IRSG rispetto all'asse di applicazione del carico.

Inserendo Eq.7.3 ed Eq.7.2 ottengo la relazione finale che lega la deformazione dell'estensimetro in PVC alla deformazione assiale del provino in Alluminio.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{xA} - \varepsilon_{xF} = \varepsilon_A \cdot (\cos \alpha - \nu \sin \alpha) \quad (7.4)$$

Dalla relazione ottenuta si dimostra come la deformazione a cui viene sottoposto l'estensimetro sia minore di quella a cui è sottoposto il provino in alluminio. La relazione ottenuta in Eq.7.4 è stata utilizzata per calcolare l'errore tra la deformazione teorico-analitica e quella ottenuta dagli estensimetri infrarossi.

7.2 Modalità di prova

Dalle prime prove effettuate (Cap.5) era emerso che il PVC e l'adesivo *Epoxy Plus* fossero i componenti migliori per la realizzazione degli estensimetri all'infrarosso *IRSG*. Dato che anche le prove a carichi maggiori (Cap.6) hanno confermato questo binomio materiale-adesivo si è deciso di svolgere le prove sugli estensimetri inclinati utilizzando esclusivamente il PVC con l'adesivo *Epoxy Plus*. Anche in questo set di prove non è cambiata l'apparecchiatura di acquisizione e di prova descritta in Par.5.2.2.

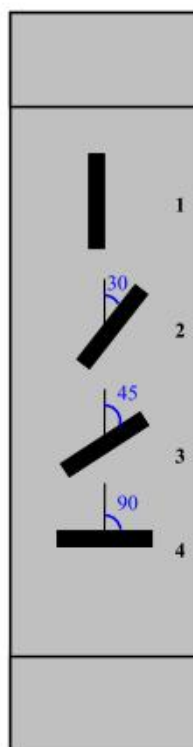


Figura 7.2: Schema di posizionamento degli IRSG sul provino in alluminio.

7.2.1 Preparazione del provino in lega di Alluminio 7075T6

Il provino su cui sono stati applicati gli estensimetri sono piatti e a sezione rettangolare costante $5\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ realizzato in lega di Alluminio 7075T6. Sul provino in alluminio sono stati montati sullo stesso lato 4 IRSG in PVC incollati tutti con la colla *Epoxy Plus* ma orientati a 4 diverse orientazioni: 0° , 30° , 45° e 90° (Fig.7.3); nel lato opposto è stato installato l'estensimetro resistivo per utilizzare il segnale in uscita dallo stesso come ingresso al modulo *lock-in* della termocamera. Il posizionamento dell'estensimetro resistivo rispecchia fedelmente quello che era già stato fatto per la preparazione delle prime prove (Cap.5, Par.5.2.3).

Installazione degli estensimetri infrarossi *IRSGs*

L'installazione degli estensimetri in PVC ha seguito lo stesso procedimento riportato in Par.5.2.3 anche se in questo caso le placchette in PVC hanno dimensioni pari a $1\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. Anche le superfici degli IRSGs sono state opacizzate con carta a grana fine mentre



Figura 7.3: Posizionamento degli estensimetri infrarossi sul provino in alluminio.

Statico [N]	Dinamico [N]	σ provino [MPa]	σ IRSG [MPa]				Frequenza [Hz]
			0°	30°	45°	90°	
12000	3750	30.9	1.3	0.9	0.6	-0.4	1,5 e 10
	6875	56.7	2.3	1.6	1.1	-0.8	
	10000	82.5	3.4	2.4	1.6	-1.1	

Tabella 7.1: Carichi applicati nelle prove con IRSGs inclinati

nelle zone di estremità preposte all'incollaggio sono stati realizzati dei solchi orizzontali in modo da favorire l'aggrappaggio adesivo-superficie estensimetro.

7.2.2 Scelta dei carichi e della frequenza di prova

I carichi e le frequenze di applicazione scelti per queste prove sono riportati in Tab.7.1.

Anche in questo caso il procedimento di prova ha previsto la seguente procedura iterativa:

- scelta del livello carico;
- applicazione della prima frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- applicazione della seconda frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;

- applicazione della terza frequenza di prova e acquisizione delle immagini con la termocamera;
- cambio del livello di carico;

Questa procedura è stata ripetuta tre volte. In questo modo, per ogni frequenza e applicazione del carico esistono tre misurazioni.

7.3 Risultati

Come evidenziato in Par.7.1 e Fig.7.1 la deformazione rilevata da un estensimetro inclinato è la componente della deformazione del provino agente lungo l'estensimetro stesso. In Tab.7.2 si riportano sinteticamente i risultati ottenuti: per ogni estensimetro viene riportato il $\Delta\sigma$ applicato al provino, quello agente sull'estensimetro $\Delta\sigma_{IRSG}$ (seconda colonna di Tab.7.2), la deformazione teorica agente lungo la direzione dell'estensimetro, la deformazione media rilevata dall'estensimetro, la deviazione standard della misura di deformazione dell'estensimetro e l'errore percentuale medio commesso dall'estensimetro nella rilevazione della deformazione (Eq.5.1). Dato che anche in queste prove non c'è stata una dipendenza delle misure dalla frequenza di prova, si sono calcolati i valori medi utilizzando le nove misure effettuate (3 misure per tre frequenze di carico) per ogni livello di carico. In Tab.7.3 si riporta l'andamento dell'errore medio percentuale in funzione del carico e dell'inclinazione dell'estensimetro. L'estensimetro applicato parallelamente al carico (inclinazione 0°) si può vedere come il valore dell'errore percentuale sia in linea con i risultati ottenuti nelle prove presentate in Cap.5 e Cap.6 in cui gli estensimetri erano applicati in linea con il carico (vedi Tab.5.8 e Tab.6.2). Per quanto riguarda il risultato ottenuto dagli altri estensimetri bisogna fare una breve considerazione: dato che l'estensimetro lavora per deformazione imposta, per le motivazioni spiegate in Par.7.1, lo sforzo agente sarà minore rispetto allo sforzo che si ha nel caso dell'allineamento tra carico ed estensimetro, tanto minore quanto aumenta l'angolo α (Fig.7.1). Ad un minore sforzo sull'estensimetro corrisponde un minore ΔT dovuto all'effetto termoelastico; in un segnale molto basso l'influenza del disturbo diventa rilevante andando ad inficiare l'accuratezza della misura. Questo spiega perchè l'errore percentuale

medio aumenti con l'inclinazione dell'estensimetro. In Tab.7.3 ad ogni colonna corrisponde un livello di sforzo applicato al provino mentre ad ogni riga corrisponde una inclinazione maggiore dell'estensimetro. In ogni colonna (e quindi a parità di carico applicato) i valori medi degli errori percentuali aumentano con l'inclinazione dell'estensimetro. In ogni riga (quindi a parità di inclinazione dell'estensimetro) i valori medi dell'errore diminuiscono con l'aumento del carico dato che la componente di deformazione agente lungo l'estensimetro cresce proporzionalmente al carico stesso. Utilizzando l'Eq.7.4 si ricava che l'estensimetro inclinato di 30° con carico applicato sul provino di 55 MPa subisce uno stato di sforzo pari a circa 1.6 MPa così come l'estensimetro inclinato di 45° con carico applicato di 80 MPa. In entrambe i casi si vede come l'errore percentuale inizi ad essere rilevante, intorno al 10%. L'estensimetro posto parallelamente alla direzione del carico con sforzo applicato di 30 MPa ha uno stato di tensione interna pari a circa 1.4 MPa. Si può concludere pertanto che uno stato interno di circa 1.5 MPa sia il requisito minimo per avere una buona misura sulla rilevazione della temperatura. L'ultima riga di Tab.7.3 si riferisce all'errore percentuale commesso dall'estensimetro posizionato a 90° rispetto alla direzione di applicazione del carico. Nell'estensimetro agisce un carico di compressione dato dalla strizione del provino (Eq.7.2) che è molto basso e quindi difficilmente rilevabile. I risultati finali a cui si è fatto riferimento in Tab.7.2 e Tab.7.3 sono stati tratti dai risultati delle misure riportati in Tab.7.4, Tab.7.4, Tab.7.4 e Tab.7.4.

1 IRSG					
$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma$ IRSG [MPa]	$\Delta\varepsilon$ teorico[$\mu\varepsilon$]	$\Delta\varepsilon$ IRSG medio[$\mu\varepsilon$]	dev.st [%]	Errore [%]
30.9	1.4	426.50	435.51	1.95	4.67
56.7	2.3	781.92	767.27	2.73	6.52
82.5	3.4	1137.34	1067.01	1.94	6.75
2 IRSG					
$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma$ IRSG [MPa]	$\Delta\varepsilon$ teorico[$\mu\varepsilon$]	$\Delta\varepsilon$ IRSG medio[$\mu\varepsilon$]	dev.st [%]	Errore [%]
30.9	0.9	298.98	279.27	7.78	18.43
56.7	1.6	548.13	500.61	2.94	9.92
82.5	2.4	797.28	726.56	2.93	9.54
3 IRSG					
$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma$ IRSG [MPa]	$\Delta\varepsilon$ teorico[$\mu\varepsilon$]	$\Delta\varepsilon$ IRSG medio[$\mu\varepsilon$]	dev.st [%]	Errore [%]
30.9	0.6	202.03	217.02	8.35	20.11
56.7	1.1	370.40	318.35	8.81	22.71
82.5	1.6	538.76	482.82	1.92	10.38
4 IRSG					
$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma$ IRSG [MPa]	$\Delta\varepsilon$ teorico[$\mu\varepsilon$]	$\Delta\varepsilon$ IRSG medio[$\mu\varepsilon$]	dev.st [%]	Errore [%]
30.9	-0.4	-140.75	-137.81	15.04	33.90
56.7	-0.8	-258.03	-183.64	11.99	29.68
82.5	-1.1	-375.32	-251.35	11.66	38.31

Tabella 7.2: Riepilogo risultati finali: media delle deformazioni rilevate dagli estensimetri ed errori percentuali commessi.

inclinazione IRSG deg°	30.9MPa		56.7MPa		82.5MPa	
	$\Delta\varepsilon$ IRSG [MPa]	Errore %	$\Delta\varepsilon$ IRSG [MPa]	Errore %	$\Delta\varepsilon$ IRSG [MPa]	Errore %
0	1.4	4.67	2.3	6.52	3.4	6.75
30	0.9	18.43	1.6	9.92	2.4	9.54
45	0.6	20.11	1.1	22.71	1.6	10.38
90	-0.4	33.90	-0.8	29.68	-1.1	38.31

Tabella 7.3: Riepilogo risultati finali: andamento dell'errore percentuale nella stima della deformazione in funzione del carico applicato e dell'inclinazione dell'estensimetro.

1 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
452.09		-25.59	6.00	424.22		2.29	0.54	386.05		40.45	9.48
648.72		133.20	17.04	810.58		-28.66	3.67	744.65		37.27	4.77
1087.46		49.88	4.39	942.22		195.12	17.16	1074.38		62.96	5.54
5Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
465.155		-38.652	9.06	459.88		-33.38	7.83	457.65		-31.14	7.30
843.013		-61.091	7.81	710.69		71.23	9.11	728.43		53.50	6.84
1166.259		-28.918	2.54	1042.67		94.67	8.32	1042.28		95.06	8.36
10Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
427.97		-1.47	0.34	423.05		3.45	0.81	423.50		3.00	0.70
814.46		-32.54	4.16	796.74		-14.82	1.90	808.19		-26.27	3.36
1048.19		89.16	7.84	1074.98		62.36	5.48	1124.67		12.68	1.11

Tabella 7.4: Risultati ottenuti con l'IRSG n°1 parallelo all'asse del carico: errori percentuali in media con gli errori percentuali commessi nelle prove di Cap.5 e Cap.6

1 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
325.60	-26.62	8.90	236.61	62.37	20.86	232.57	66.41	22.21			
481.03	67.10	12.24	578.88	-30.76	5.61	472.64	75.49	13.77			
738.65	58.63	7.35	634.73	162.55	20.39	765.35	31.92	4.00			
5 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
283.886	15.09	5.05	431.59	-132.61	44.35	270.88	28.10	9.40			
529.791	18.34	3.35	451.37	96.76	17.65	483.65	64.47	11.76			
821.349	-24.07	3.02	656.18	141.09	17.70	784.51	12.77	1.60			
10 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
220.57	78.40	26.22	259.56	39.42	13.19	252.15	46.83	15.66			
447.17	100.96	18.42	522.71	25.41	4.64	538.26	9.87	1.80			
683.86	113.41	14.22	685.88	111.39	13.97	768.56	28.72	3.60			

Tabella 7.5: Risultati ottenuti con l'IRSG n°2 inclinato di 30° rispetto all'asse di applicazione del carico

1 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
239.66	-37.63	18.63	236.04	236.04	18.63	-34.00	16.83	90.74	90.74	111.30	55.09
239.45	130.95	35.35	500.69	500.69	35.35	-130.29	35.18	384.39	384.39	-13.99	3.78
435.83	102.93	19.10	482.70	482.70	19.10	56.06	10.41	512.68	512.68	26.07	4.84
5 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
265.213	-63.18	31.27	279.67	279.67	31.27	-77.64	38.43	225.03	225.03	-23.00	11.38
297.614	72.78	19.65	293.49	293.49	19.65	76.91	20.76	345.16	345.16	25.23	6.81
468.733	70.03	13.00	508.83	508.83	13.00	29.93	5.56	512.31	512.31	26.45	4.91
10 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
205.67	-3.63	1.80	197.87	197.87	1.80	4.16	2.06	213.25	213.25	-11.21	5.55
228.80	141.60	38.23	263.24	263.24	38.23	107.15	28.93	312.31	312.31	58.08	15.68
464.04	74.71	13.87	501.82	501.82	13.87	36.93	6.86	458.38	458.38	80.38	14.92

Tabella 7.6: Risultati ottenuti con l'IRSG n°3 inclinato di 45° rispetto all'asse di applicazione del carico

1 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
-209.29		68.54	48.70	-56.96		-83.79	59.53	-186.23		45.49	32.32
-239.34		-18.70	7.25	-88.05		-169.98	65.88	-111.68		-146.36	56.72
-243.46		-131.87	35.13	-206.09		-169.24	45.09	-235.94		-139.38	37.14
5 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
-177.023		36.28	25.77	-178.79		38.04	27.03	-133.30		-7.45	5.29
-260.370		2.34	0.91	-265.61		7.58	2.94	-178.96		-79.08	30.65
-289.208		-86.11	22.94	-229.19		-146.13	38.93	-227.48		-147.85	39.39
10 Hz											
1 misura				2 misure				3 misure			
$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %	$\Delta\varepsilon$	IRSG [$\mu\varepsilon$]	Errore [$\mu\varepsilon$]	Errore %
-121.82		-18.92	13.45	-153.90		13.16	9.35	-22.95		-117.80	83.69
-220.24		-37.79	14.65	-158.80		-99.23	38.46	-129.73		-128.31	49.73
-464.48		89.15	23.75	-217.09		-158.23	42.16	-149.22		-226.10	60.24

Tabella 7.7: Risultati ottenuti con l'IRSG n°4 inclinato di 90° rispetto all'asse di applicazione del carico

8

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo lavoro di tesi si è analizzato l'utilizzo del materiale termoplastico come estensimetro infrarosso. Dopo uno studio preliminare, si sono scelti il Poliammide6 (PA6) e il Polivinilcloruro (PVC) entrambe caratterizzati da un Modulo di Young pari a 3 GPa. Per testare l'influenza dell'incollaggio sulla misura delle deformazioni sono stati utilizzati quattro adesivi diversi: l'Epoxy Plus, l'RS, il Click Bond CB200 e l'AE-10. Sono stati realizzati quattro estensimetri in PVC e quattro in PA6 ognuno dei quali incollato con un adesivo diverso.

I risultati migliori delle prove sono stati raggiunti dall'estensimetro in PVC incollato con l'adesivo Epoxy-Plus; da tali risultati si possono trarre le seguenti conclusioni.

Facilità di utilizzo. La messa in opera degli estensimetri in PVC risulta molto più semplice sia rispetto all'installazione degli estensimetri resistivi che degli estensimetri infrarossi in metallo (non necessitano di verniciatura superficiale).

Deformabilità adesivo. E' stato superato il problema legato all'estrema deformabilità dell'adesivo emerso dalle prove svolte con gli estensimetri metallici (Tab.6.3, Fig.6.1, Fig.6.2 e Fig.6.3).

Frequenza di prova. Con i livelli di tensione utilizzati durante le prove è stata rilevata una sostanziale indipendenza del comportamento del PVC dalla frequenza di applicazione del carico sia nella fase di calibrazione (Tab.4.2 e Fig.4.6), che durante l'utilizzo come estensimetro infrarosso (Tab.5.8 e Tab.6.3).

Misura delle deformazioni. Nelle prove effettuate con gli estensimetri posizionati parallelamente al carico e a livelli di tensione sul provino in alluminio compresi tra i 30 MPa e i 240 MPa

(Tab.5.8 e Tab.6.3) gli errori di misura sono in linea se non inferiori a quelli commessi dagli estensimetri resistivi, nella fattispecie ci si riferisce a errori medi sulla rilevazione della deformazione intorno al 5% con picchi di errore mai superiori al 10%.

Prestazioni del PVC. Dalle prove è emerso che l'estensimetro in PVC dà risultati soddisfacenti se sottoposto ad una deformazione minima di $400 \mu\varepsilon$ che genera uno stato di sforzo interno all'estensimetro pari a circa 1.4 MPa (corrispondenti a 30 MPa su provino in alluminio nel caso di estensimetro posizionato parallelamente all'asse di applicazione del carico). Uno stato di tensione inferiore genera un segnale termico più basso e meno preciso come dimostrato dai risultati ottenuti dagli estensimetri inclinati (Tab.7.3). Questo problema verrebbe superato utilizzando un materiale con un Modulo di Young più alto o applicando un pretensionamento all'estensimetro.

Concludendo si può ritenere che nel caso di estensimetro posizionato parallelamente all'asse di applicazione del carico l'utilizzo del PVC ha dato delle misure caratterizzate da una buona ripetibilità e da bassi valori di errore sulla stima della deformazione. Inclinando gli estensimetri in PVC rispetto all'asse di applicazione del carico si sono messe in evidenza le carenze dovute al basso valore del modulo di Young del materiale.

Alla luce di queste considerazioni, si propongono degli eventuali sviluppi al lavoro di tesi presentato.

Ulteriori prove con PVC Nei test svolti in questo lavoro si sono utilizzati esclusivamente dei provini in alluminio. Per analizzare il comportamento del PVC su altri tipi di materiale si potrebbero svolgere ulteriori prove a fatica ciclica utilizzando gli stessi carichi e frequenze di prova di Tab.5.1 ma variando il materiale del provino utilizzato (leghe di titanio e materiali compositi di tipico impiego aeronautico).

Prove con altro materiale termoplastico Le carenze evidenziate inclinando gli estensimetri rispetto all'asse di applicazione del carico verrebbero superate utilizzando un materiale termoplastico con Modulo di Young superiore a quello del PVC. Da una

stima preliminare (Eq.2.3) già con un Modulo di Young di 10 GPa si potrebbe avere un aumento rilevante del segnale termoelastico generato con conseguente bassa influenza del disturbo. Un materiale termoplastico con un Modulo di Young vicino a questo valore unirebbe la semplicità di messa in opera che contraddistingue i materiali termoplastici con una maggiore precisione nella misura.

A

Ricerca del materiale

A.1 Introduzione al lavoro

La ricerca del materiale è stata una parte importante del lavoro svolto. I requisiti fondamentali richiesti al materiale sono stati principalmente:

1. omogeneità ed isotropia;
2. modulo di Young di almeno 3000 MPa;

Il primo soddisfa le ipotesi che sono alla base della relazione termoelastica fondamentale. Il secondo permette di ottenere un segnale ΔT significativo durante l'analisi termoelastica e al contempo allevia i problemi di estrema deformabilità dell'adesivo manifestatosi con gli estensimetri metallici con modulo di Young troppo elevato. In quel caso, data la grossa differenza presente tra la E del metallo e quella dell'adesivo utilizzato, veniva a mancare la perfetta adesione tra la placchetta metallica e la struttura sottostante durante la deformazione. Sulla base di questa esperienza si è voluto rivolgere l'attenzione verso un materiale che avesse un modulo di Young più vicino all'adesivo. La combinazione di questi requisiti ha orientato la ricerca del materiale verso la famiglia dei *Materiali Termoplastici*.

Durante la ricerca del materiale i requisiti riportati sono stati molte volte in contrasto. La maggior parte delle plastiche in commercio non sono pure, ma vengono caricate con particelle o fibre di altra natura (principalmente ceramica) che ne migliorano le prestazioni meccaniche ma violano il requisito di omogeneità ed isotropia del materiale. Le plastiche che sono presenti allo stato puro, d'altro canto, manifestano delle caratteristiche fisiche scadenti per il nostro impiego, in particolare hanno un modulo di Young troppo basso per l'utilizzo come estensimetri infrarossi.

A.2 Le caratteristiche tecniche necessarie

La conoscenza delle caratteristiche tecniche si è resa necessaria durante la fase preliminare del lavoro, in particolare la conoscenza del Calore specifico, del coefficiente di dilatazione lineare e della densità sono serviti per stimare l'effetto termoelastico.

$$\Delta T_{irsg} = K_{0irsg} \cdot T_0 \cdot \Delta \sigma_{irsg} \quad (\text{A.1a})$$

$$K_0 = \frac{\alpha}{\rho \cdot Cp} \quad (\text{A.1b})$$

- Cp è il calore specifico;
- α è il coefficiente di dilatazione lineare ;
- ρ è la densità .

Il materiale è stato acquistato in fogli di spessore opportuno da cui poter ricavare gli estensimetri. Oltre ai fogli sono state acquistate anche delle barre dello stesso materiale da cui poter ricavare dei provini per le prove di caratterizzazione necessarie alla determinazione della costante di calibrazione del materiale.

A.3 Contatti utili

La scelta del materiale più idoneo al lavoro si è rivolta prima di tutto alle risorse del *web*, poi alla ricerca del produttore/distributore da cui rifornirsi ovvero industrie della plastica e negozi specializzati. La ricerca nei punti vendita (ferramente specializzate e negozi di modellismo) è stata quasi subito abbandonata a causa della mancanza di dati tecnici sui propri prodotti necessari ai calcoli preliminari. La ricerca si è quindi rivolta esclusivamente alle aziende produttrici di semilavorati. Le aziende contattate e i siti presi in considerazione durante la ricerca sono stati molti, ma tra i più vengono riportati quelli che hanno contribuito in maniera rilevante al lavoro:

www.matweb.com E' un sito internet con un database con più di 78000 materiali. E' un motore di ricerca molto funzionale che permette di cercare un materiale in base alle proprietà richieste

dall'utente. La ricerca può spaziare su quasi tutte le tipologie di materiali esistenti.

www.GoodFellow.com Goodfellow è un'azienda con sedi nel Regno Unito, Francia, Germania e Stati Uniti. Rifornisce metalli puri, leghe, ceramiche, polimeri e compositi ecc per la ricerca e ai mercati industriali. Goodfellow serve la ricerca e lo sviluppo offrendo piccoli quantitativi di materiale ma anche grandi quantità di materiale sul mercato della produzione industriale. Dal suo database è possibile ottenere indicazioni utili sulle caratteristiche tecniche dei materiali termoplastici.

www.musolametalli.it La Musola Metalli è l'azienda da cui si è ottenuto il rifornimento del materiale utilizzato nel lavoro di tesi. Una delle poche aziende in cui si può avere accesso libero ai dati tecnici dei semilavorati in materiale termoplastico prodotti. Questo aspetto è di fondamentale importanza per stabilire quale materiale sia più adatto al lavoro di tesi previsto.

In Tab.A.1 sono riportate alcune delle aziende del settore plastico contattate durante la ricerca.

Azienda	Prodotto
ABCS Ricerche	Servizi di formazione per l'industria delle Materie Plastiche.
ATS S.r.l.	Produzione sistemi di tenuta basati su ingegneria plastica.
Cavinato s.a.s.	Specializzati nella produzione di espositori da banco e da terra, display e vetrine in Plexiglass.
ELESA S.P.A.	Produzione elementi standardizzati per macchine in materiale plastico
EPF s.n.c.	Produzione e vendita profili in plastica e elementi di arredo per giardino, tubi in PVC, profili prodotti su specifica del cliente.
Eurograte Grigliati	Eurograte leader europeo nella produzione di grigliati, recinzioni, profili pultrusi, scale industriali. Tutti prodotti in vetroresina.
Everplast Materie Plastiche	Gli specialisti della produzione di articoli in plastica. Eseguono lavorazioni di serigrafia, tampografia, stampe a caldo su oggetti.
ROBERMES S.r.l	Specializzata nella costruzione di stampi e lavorazione delle materie plastiche, anche su disegno del cliente.
DILPLAST	Termoformature
Wahhworks	Modelli e Prototipi
SALPES Srl	Stampaggio materie plastiche - termoplastico termoindurente
GIANNAZZA ANGELO S.p.A	Stampaggio termoplastici e produzione stampi
AF Tecnoplastica	Costruzione articoli tecnici si occupa di stampaggio iniezione, articoli plastica, stampaggio articoli plastica, stampaggio articoli tecnici.
CO.S.MA.PLAST. S.r.l	Costruzione Stampi Materie Plastiche ha esperienza nel campo dello stampaggio di articoli tecnici in materiale termoplastico.
AWS	Stampi Stampaggio Materie Plastiche Iniezione.
Balacchi srl	Completa gamma di saldatrici HF, elettrodi, lame e stampi per la termoformatura e la saldatura del foglio di PVC.
Ci-Esse Stampi per termoplastici .	Stampi, termoplastici, poliuretani, progettazione e costruzione stampi per materie plastiche.
Domoplast S.r.l.	Stampaggio materie plastiche articoli tecnici ed estetici
M.C. Packing s.r.l.	Macchine Confezionatrici, Skimpack, Blister, Fustellatrici, Termoformatrici, Stampaggio materie Plastiche.
Nova Angelo Srl	Stampaggio di precisione di materiali termoplastici e termoindurenti.
Plastic Pol S.n.c.	La Plastic Pol S.n.c. vanta una lunga esperienza nel campo del soffiaggio e stampaggio di materie plastiche.

Tabella A.1: Alcune delle aziende contattate per l'approvvigionamento di materiale plastico

Bibliografia

- [1] A. Salerno and S. Desiderati. Procedure proposal for the correction of nonadiabatic thermoelastic stress analysis result. *Review of Scientific Instruments*, 75(2):507–514, 2004.
- [2] A. Gallotti and A. Salerno. An experimental investigation on parameters influencing infrared strip gauges to perform thermoelastic stress measurements. *Measurement Science and Technology*, (18):1250–1256, 2007.
- [3] A. Gallotti. *Sviluppo di tecniche di analisi termoelastica quantitativa su componenti di elicottero in prova a fatica*. PhD thesis, Politecnico di Milano, 2004–2005.
- [4] Y. A. Cengel. *Termodinamica e trasmissione del calore*. McGraw-Hill, 2005.
- [5] N. Harwood and W. M. Cummings. *Thermoelastic stress analysis*. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 1991.
- [6] F. P. Incropera, D. P. De Witt, T. L. Bergman, and A. S. Lavigne. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley & sons, 2006.
- [7] The Matworks. Matlab. www.mathworks.com, 2007.
- [8] C. Majorana e V. Salomoni. *Scienza delle costruzioni*. Città studi edizioni, 2007.