

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali

Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali



**STUDIO DEL DANNEGGIAMENTO IN UN MATERIALE
IBRIDO A SANDWICH MEDIANTE TERMOGRAFIA**

Relatore: Prof. Laura Vergani

Correlatore: Ing. Chiara Colombo

Tesi di Laurea di:

Luca Acquati

Matr. 749596

Anno accademico 2012-2013

Introduzione	1
Capitolo1. I materiali compositi a sandwich	3
1.1. Introduzione ai materiali compositi a sandwich	3
1.2. Le proprietà meccaniche dei materiali compositi a sandwich	4
1.3. La storia dei materiali compositi a sandwich.....	5
Capitolo 2. I materiali oggetto di studio	8
2.1. Composizione del materiale sandwich trattato	8
2.2. Gli acciai inossidabili.....	8
2.2.1. Nomenclatura AISI	9
2.2.2. Gli acciai inossidabili ferritici	10
2.2.3. Gli acciai inossidabili martensitici	11
2.2.4. Gli acciai inossidabili austenitici	12
2.2.4. Gli acciai inossidabili duplex	14
2.2.5. Acciaio 316L.....	14
2.3. Le gomme etilene-propilene	16
2.3.1. La composizione chimica.....	17
2.3.2. I campi applicativi.....	18
2.4. Le resine epossidiche	19
2.5. Metodo di produzione del materiale composito a sandwich oggetto dello studio.....	23
2.6. Metodi di trattamento delle superfici.....	24
2.6.1. L'energia superficiale	24
2.6.2. Trattamento plasma e corona	26
Capitolo 3. La termografia IR	30
3.1. Effetto termoelastico.....	30
3.1.1. Introduzione	30
3.1.2. La teoria dell'effetto termoelastico	31
3.2. Misurazione della temperatura.....	33
3.3. Preparazione della superficie	35

3.4. Sistemi di acquisizione del segnale	35
3.4.1. Sistema SPATE.....	36
3.4.2. Sistema Delta Therm.....	36
3.5. La termografia IR applicata alle prove a fatica.....	37
3.6. La termografia IR applicata alle prove statiche a trazione	41
3.6.1. Curva sforzo-deformazione.....	42
3.6.2. Variazione della temperatura superficiale durante la prova.....	43
Capitolo 4. Analisi presenti in letteratura sul materiale composito trattato	46
4.1. Analisi e confronto dei trattamenti superficiali	46
4.2. Test di adesione	48
4.2.1. Shear test	51
4.3. Caratterizzazione meccanica.....	54
Capitolo 5. Metodo di sperimentazione	58
5.1. Danneggiamento controllato delle lastre	59
5.1.1. Descrizione del metodo utilizzato.....	59
5.1.2. Esecuzione delle prove.....	60
5.2. Metodologia di svolgimento della prova di trazione	62
5.2.1. Determinazione delle caratteristiche a trazione	66
5.3. Analisi termografica	66
5.4. Risultati delle prove a trazione sulle provette integre.....	67
5.4.1. Analisi della linearità nel grafico sforzo-deformazione	70
5.4.2. Analisi della temperatura superficiale.....	72
5.4.3. Calcolo del minimo nel grafico relativo alla temperatura.....	75
5.4.4. Calcolo della costante termoelastica	76
5.5. Risultati del danneggiamento controllato sulle lastre	78
5.6. Risultati dei test a trazione delle provette con la zona danneggiata	80
5.7. Analisi della relazione tra l'energia di impatto e la temperatura superficiale durante la prova di trazione	93
Conclusioni.....	97
Bibliografia.....	99

Riassunto

Lo scopo di questo lavoro di tesi è l'analisi termografica di un'area danneggiata in un materiale ibrido a sandwich durante l'esecuzione di una prova a trazione. Il materiale oggetto di studio è composto da due fogli metallici esterni (acciaio 316L) e da un nucleo in materiale polimerico (poliolefina). La prima parte del lavoro consiste in una serie di prove a trazione e la consecutiva analisi della temperatura superficiale durante la prova. La seconda parte del lavoro adotta lo stesso metodo della prima, con la differenza che i materiali analizzati sono stati precedentemente danneggiati. Il danneggiamento stato fatto in modo controllato, tramite l'impatto con un proiettile lasciato cadere da altezze predefinite. Nella seconda parte del lavoro, in aggiunta al materiale sandwich, sono stati analizzati altri materiali affini: fogli di acciaio e metà sandwich (un foglio di acciaio con incollato un foglio polimerico). In particolare l'analisi è concentrata sull'andamento della temperatura nell'area danneggiata durante i primi secondi della prova di trazione. L'obiettivo finale è quello di comparare i risultati, mettendo in relazione l'energia di impatto con l'andamento della temperatura durante la prova di trazione.

Introduzione

Questa tesi è risultato di un lavoro sperimentale svolto presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

La sperimentazione consiste nell'analisi termografica di un pannello in materiale composito sottoposto a trazione. Il materiale oggetto di studio è un pannello composito a sandwich costituito da due fogli di acciaio 316 e un nucleo in materiale polimerico. Tale pannello viene danneggiato in modo controllato impattandolo con un proiettile fatto cadere da altezze predefinite. Obiettivo finale della tesi è lo studio dell'andamento della temperatura superficiale del materiale danneggiato durante i primi istanti di una prova di trazione.

Il materiale composito a sandwich trattato nel presente lavoro, è composto da due fogli esterni di acciaio inox austenitico 316L con uno spessore nominale di 0,5 mm e un nucleo costituito da un foglio di poliolefina dello spessore di 0,6 mm. Tale foglio è composto da una miscela di polimeri, quali polipropilene (PP) e polietilene (PE), con aggiunta di talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), rutilo (TiO_2) e barite ($BaSO_4$).

Come adesivo viene usata una resina epossidica commerciale (koratacr FL 201).

Durante la prima fase del lavoro, tramite tranciatura, si sono ritagliati tre provini rettangolari sottoposti successivamente alla prova di trazione fino alla rottura. I primi 2 provini sono stati sollecitati applicando un carico di trazione con una velocità di 5 mm/min nella direzione longitudinale a quella di rullatura del materiale ibrido, il terzo provino con una velocità di 10 mm/min nella direzione trasversale a quella di rullatura. Tutte le prove sono state riprese con una termo camera al fine di monitorare costantemente la temperatura superficiale.

Riportando i dati ottenuti dalla cella di carico della macchina di trazione e dalla termo camera in un foglio elettronico sono state ricavate le proprietà del materiale, quali: modulo di Young, sforzo e deformazione allo snervamento, sforzo massimo, deformazione a rottura. Inoltre, analizzando la variazione di temperatura nei primi istanti, è stato possibile calcolare il limite di fatica.

Durante la seconda fase del lavoro si è deciso di danneggiare in modo controllato le lastre di materiale e ripetere le prove di trazione analizzando la variazione di temperatura (a questo punto non più omogenea sulla superficie).

Per danneggiare le lastre in modo controllato si è scelto di impattare le lastre con un proiettile in acciaio. Il proiettile è stato fatto cadere da diverse distanze in vari punti della lastra, misurata la velocità al momento dell'impatto si è calcolata l'energia scambiata durante l'urto.

Successivamente, mediante tranciatura sono stati ricavati i provini da testare, ognuno con al centro una zona deformata dall'impatto. Come per il materiale privo di difetti macroscopici, è stata eseguita una prova di trazione per ogni provino monitorando la temperatura superficiale dello stesso con la termo camera.

La fase finale del lavoro è stata l'analisi e il confronto dei dati di temperatura ottenuti: sono stati analizzati i video registrati dalla termo camera: utilizzando il software Altair per ogni provino sono state selezionate alcune aree superficiali di interesse ed è stata estrapolata in Excel la temperatura media ad ogni istante della prova. Si è illustrato graficamente l'andamento della variazione di temperatura nelle varie zone della superficie in funzione del tempo e analizzando tali curve si è cercato di stabilire l'entità del danno per ogni zona.

Capitolo 1. I materiali compositi a sandwich

1.1. Introduzione ai materiali compositi a sandwich

In ambito industriale si è costantemente alla ricerca di maggior economia e maggior qualità, prendendo in considerazione i materiali utilizzati per la costruzione di un prodotto, la maggior qualità è spesso data da elevata resistenza a snervamento/rottura, elevato modulo di Young, bassa densità. Il costo relativo del materiale dipende invece oltre che dal prezzo del materiale stesso, dalla facilità di lavorazione e dalle proprietà meccaniche di interesse in rapporto al peso.

L'acciaio vanta proprietà meccaniche quali il modulo di Young, la resistenza a snervamento, la resistenza a rottura molto elevate, inoltre ha un prezzo di acquisto relativamente ridotto, tuttavia recentemente in molti settori, in primis quello dei trasporti, ha perso e sta ulteriormente perdendo competitività. Nel settore dei trasporti la leggerezza è una qualità di grande rilievo in quanto garantisce prestazioni superiori e consumi di carburante inferiori: in molte applicazioni l'acciaio viene sostituito da materiali più leggeri quali alluminio e magnesio [1].

Recentemente gli acciai austenitici con alto contenuto di manganese sono diventati più economici, di conseguenza la loro competitività sul mercato è aumentata, grazie anche alla loro elevatissima resistenza meccanica, buon comportamento a formatura e facilità di riciclaggio.

I vantaggi di questa tipologia di acciaio ad elevata resistenza possono essere amplificati se viene utilizzato per la costruzione di un materiale composito multistrato. I compositi sandwich metallo-polimero presentano una buona combinazione di elevata resistenza e duttilità, che permettono di avere buone proprietà di imbutitura e formatura.

Questa tipologia di materiali compositi stanno diventando sempre più competitivi in ambito industriale perché permettono di coniugare elevate proprietà meccaniche, riduzione di peso, buon isolamento termico, acustico e smorzamento di vibrazioni.

1.2. Le proprietà meccaniche dei materiali compositi a sandwich

I materiali compositi a sandwich sono una classe speciale di materiali compositi. Tipicamente sono costituiti da due sottili strati superficiali in materiale rigido (pelli), incollati ad un nucleo più spesso di materiale a bassa densità (core). Lo scopo del core è quello di distanziare le pelli dall'asse neutro, in modo da aumentare il momento di inerzia della sezione e aumentare di conseguenza la resistenza a flessione. [2] Infatti in una generica sezione di una trave soggetta a flessione la tensione unitaria si calcola con la seguente relazione di Navier (1.1):

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot y}{J} \quad (1.1)$$

Dove:

σ_f : sforzo (MPa)

M_f : momento flettente (Nmm)

y : distanza del punto dall'asse neutro (mm)

J : momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro (mm⁴)

Per questo solitamente il core può avere scarse proprietà meccaniche, ma deve essere molto leggero. Distanziando le pelli si ottiene un enorme incremento di rigidità flessionale rispetto ad un pannello costituito soltanto da uno spessore di materiale pari a quello delle due facce, a discapito di un incremento di peso molto contenuto (dovuto al core).

Per il core vengono spesso impiegate strutture con celle a nido d'ape, materiali polimerici, schiume.

Per le pelli vengono solitamente impiegati materiali con elevata resistenza meccanica come ad esempio alluminio, acciaio, materiali compositi in fibra di vetro, carbonio o kevlar.

1.3. La storia dei materiali compositi a sandwich

La prima applicazione industriale di un materiale a sandwich risale alla seconda guerra mondiale. Il primo materiale di questo tipo fu brevettato nel 1924 per la costruzione di aerei da Thomas Von Karmann e Peter Stock. Il cacciabombardiere della seconda guerra mondiale “De Havilland, 98 Mosquito” è stato costruito in gran parte con sandwich formati da strati superficiali di compensato e nucleo in legno di balsa (da qui il soprannome “wooden wonder”) [1].

L’industria aeronautica è sempre stata pionieristica e all’avanguardia nella ricerca e nello sviluppo di nuovi materiali compositi. In questo settore sono stati sviluppati materiali come l’ARALL (Aramid Fibre Reinforced Aluminium Laminates), il GLARE (Glass Fibre Reinforced Aluminium Laminates) e il CARALL (Carbon Fiber Reinforced Aluminium Laminates). Questi materiali sono formati da tre o più strati, nel caso dei tre strati la composizione classica consiste in due strati superficiali di alluminio con spessore dai 0,2 a 0,5 mm e uno strato centrale di fibre immerse in una matrice di resina epossidica con spessori da 0,125 a 0,5 mm. [3]

Ventisette pannelli di rivestimento della fusoliera dell’ Airbus A 380 sono realizzati in GLARE [4] permettendo un forte risparmio di peso rispetto ai pannelli di alluminio convenzionali.



Figura 1.1 Airbus A380 in volo

I materiali compositi a sandwich non vengono usati solo nel settore aeronautico, infatti stanno prendendo piede anche in quello automobilistico in cui è importante il contenimento del peso e l'isolamento acustico. Alcune tipiche applicazioni in questo settore riguardano il coperchi della scatola del cambio, coppe olio, copertura bagagliaio, componenti di telaio e carrozzeria. Il materiale più utilizzato per questo tipo di applicazioni consiste in un materiale sandwich a tre strati: due fogli esterni di acciaio e uno interno in materiale polimerico. Questi componenti possono essere più leggeri fino al 50 % rispetto ad un normale acciaio da imbutitura.

Attualmente, molti progetti industriali e gruppi di ricerca stanno studiando la produzione, l'incollaggio, la formatura, i rinforzi, la meccanica e la giunzione termica di SMS (sandwich composite materials). Ciò dimostra un particolare interesse per lo studio delle proprietà dei materiali compositi e le loro applicazioni.

Ad esempio, Bondal sviluppato da ThyssenKrupp Steel AG, si basa su due fogli di copertura in acciaio con un nucleo polimerico dello spessore di una decina di micron. Questo SMS è caratterizzato da elevata capacità di smorzamento, elevata formabilità e resistenza alla corrosione ed è utilizzato principalmente nel settore automobilistico. Un altro laminato sandwich è il composito Hylite, costituito da fogli di alluminio-polipropilene-alluminio con uno spessore di 0.2/0.8/0.2 mm. Tale materiale presenta una buona resistenza alla corrosione, buone proprietà di smorzamento e assorbimento acustico, buona formabilità per imbutitura. È già stato utilizzato in diverse applicazioni, nel campo automobilistico, aeronautico e navale. La Ford Motor Company ha utilizzato pannelli di Hylite per la costruzione di un prototipo di Ford Ka elettrica, su questa tipologia di veicoli il contenimento del peso è di primaria importanza per compensare il peso del pacco batterie e aumentare il più possibile l'autonomia delle stesse tramite la riduzione dell'inerzia del veicolo. I pannelli di composito sono stati utilizzati per il tetto (riducendo il peso di 5,5 Kg) e per il cofano (-5,3 Kg). Il contenimento delle masse in queste zone del veicolo porta anche ad un abbassamento del baricentro riducendo di conseguenza i trasferimenti di carico dovuti alle accelerazioni a cui è sottoposto il veicolo in marcia, si ottengono così migliori prestazioni e doti di handling. [5]

Capitolo 2. I materiali oggetto di studio

2.1. Composizione del materiale sandwich trattato

Il materiale composito a sandwich trattato nel presente lavoro, è composto da due fogli di acciaio inox austenitico (316L) con uno spessore nominale di 0,5 mm.

Il nucleo consiste in un foglio di poliolefina dello spessore di 0,6 mm. Tale foglio è composto da una miscela di polimeri, quali polipropilene (PP) e polietilene (PE), con aggiunta di talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), rutilo (TiO_2) e barite ($BaSO_4$).

Come adesivo viene usata una resina epossidica commerciale (koratacr FL 201).

2.2. Gli acciai inossidabili

Gli acciai inossidabili sono una particolare categoria di acciai con la peculiarità di resistere alla corrosione.

La loro notevole resistenza alla corrosione è dovuta alla presenza del cromo, che permette la formazione di una pellicola di ossido sulla superficie che protegge il metallo sottostante.

Per esempio, il comune acciaio al carbonio esposto ad acqua piovana si corrode formando un ossido di ferro marrone sulla superficie, comunemente chiamato ruggine. Questo strato non è protettivo e alla fine l'intero pezzo di acciaio si corrode convertendosi in ruggine.

Invece quando la percentuale di cromo in lega supera il 10%, l'ossido sulla superficie è molto sottile (2-3 nanometri), invisibile e protettivo. Questo strato passivo possiede un'altra fondamentale proprietà: quando viene danneggiato è in grado di autoripararsi, il

cromo presente nell'acciaio reagisce rapidamente con l'ossigeno e l'umidità presenti nell'ambiente formando nuovamente lo strato di ossido. [6]

Gli acciai inox si dividono, secondo la loro microstruttura, in:

-ferritici

-martensitici (compresi gli acciai indurenti per precipitazione)

-austenitici

-duplex, composti da una miscela di ferrite e austenite

All'interno di ciascuno di questi gruppi, esistono diversi gradi di acciaio inossidabile definiti in base alla loro composizione.

2.2.1. Nomenclatura AISI

La notazione AISI (American Iron and Steel Institute, istituto di unificazione statunitense per ferro ed acciaio) classifica l'acciaio inox attraverso una sigla a tre cifre con possibile aggiunta di una lettera, a prima di queste cifre indica la classe dell'acciaio.

Tabella 2.1. la nomenclatura AISI per gli acciai

Serie 2XX	Acciaio austenitico al cromo-nichel-manganese
Serie 3XX	Acciaio austenitico al cromo-nichel e cromo-nichel-molibdeno
Serie 4XX	Acciai ferritici o martensitici al cromo
Serie 5XX	Acciaio martensitico al cromo medio
Serie 6XX	Acciaio indurente per precipitazione al cromo

Tra le lettere aggiunte ci possono essere “N” che indica la presenza di azoto in lega, “T” che indica la presenza di titanio, “L” che indica la bassa percentuale di carbonio presente. [8]

2.2.2. Gli acciai inossidabili ferritici

Gli acciai inossidabili ferritici sono costituiti da cromo (tipicamente 12,5% o 17%) e ferro, non contengono percentuali significative di nichel. La struttura del reticolo cristallino è cubica a corpo centrato come gli acciai al carbonio.

Contengono una bassa percentuale di carbonio e non sono trattabili termicamente, ma possiedono una buona resistenza all'ossidazione e una resistenza alla corrosione superiore agli acciai inossidabili martensitici.

Il limite di snervamento è molto basso e non essendo trattabili termicamente, si esegue la ricristallizzazione o l'incrudimento. E' consigliabile non scaldarlo oltre gli 850 °C per non ingrossare il grano, e di non sostare tra i 400 e i 570 °C nel raffreddamento, per non incorrere nella fragilità da rinvenimento.

Sono ferromagnetici e anche se diventano fragili alle basse temperature, possiedono adeguate proprietà di formabilità.

Il loro coefficiente di espansione termica e le altre proprietà termiche sono simili a quelle degli acciai convenzionali.

Sono saldabili facilmente in sezioni sottili, ma in sezioni più spesse soffono di ingrossamento dei grani che porta ad una riduzione di tenacità.

Questa tipologia di acciaio viene utilizzata principalmente per vasellame o posateria di bassa qualità, acquari, lavelli e finiture per l'edilizia. [7]

2.2.3. Gli acciai inossidabili martensitici

Gli acciai inossidabili martensitici sono costituiti da carbonio (0,2-1,0%), cromo (10,5-18%) e ferro.

Questi materiali hanno caratteristiche meccaniche molto elevate e sono ben lavorabili alle macchine, inoltre sono gli unici acciai inox che possono essere trattati termicamente con procedimenti simili a quelli per gli acciai convenzionali, pertanto si possono migliorare le proprietà meccaniche quali carico di rottura, carico di snervamento e durezza.

L'acciaio inossidabile martensitico è autotemprante, ma dalla temperatura di laminazione alla temperatura ambiente nasce una struttura troppo tensionata; si segue sempre quindi la procedura:

- ricottura di lavorabilità: essa è svolta col metodo isotermico solo quando si voglia la durezza minima; altrimenti si raffredda a velocità costante, scegliendola in base alla durezza che si vuole ottenere (vedi curve CCT);
- tempra a temperatura di circa 1000 °C e per un tempo sufficiente a sciogliere i carburi di cromo;
- rinvenimento a temperature diverse a seconda che si voglia privilegiare la durezza, la resistenza alla corrosione o la tenacità.

La loro resistenza alla corrosione non è eccellente, in particolare è inferiore agli altri acciai inossidabili a parità di contenuto di cromo in lega. Questo è dovuto al fatto che la struttura martensitica possiede una elevata densità di difetti reticolari. Sono magnetici, hanno scarsa formabilità e la saldatura è difficoltosa.

Sono utilizzati soprattutto per la loro elevata resistenza allo scorrimento viscoso e per l'elevata durezza: iniettori per motori a scoppio, coltelli, forbici, bisturi, lamette. [7]

2.2.4. Gli acciai inossidabili austenitici

Gli acciai inossidabili austenitici sono acciai con struttura cristallina cubica a facce centrate, sono costituiti da cromo (16-26%), nichel (6-12%) e ferro. Altri elementi in lega (ad esempio molibdeno) possono essere aggiunti per ottenere le proprietà desiderate.

La composizione base dell'acciaio inox austenitico è il 18% di Cr e l'8% di Ni, codificata in 18/8 (AISI 304).

Una percentuale del 2-3% di molibdeno permette la formazione di carburi di molibdeno migliori rispetto a quelli di cromo e assicura una miglior resistenza alla corrosione dei cloruri (come l'acqua di mare e di sali disgelanti) (acciaio 18/8/3) (AISI 316). Il contenuto di carbonio è basso (0,08% max di C), ma esistono anche acciai inox austenitici dolci (0,03% di C max). L'acciaio inox austenitico può essere stabilizzato con titanio o niobio per evitare una forma di corrosione nell'area delle saldature. Considerando la notevole percentuale di componenti pregiati (Ni, Cr, Ti, Nb, Ta), gli acciai inox austenitici sono fra i più costosi tra gli acciai di uso comune. [6]

Tabella 2.2 La nomenclatura degli acciai inox austenitici

% Cr	% Ni	AISI	UNI EN 10088-1
18	10	304, 316	X5CrNi1810, X5CrNiMo1712-2
18	10	321, 347, 348	X8CrNiTi1810, X8CrNiNb1811
18	13	317	X8CrNiMb1712
23	12	309	
25	20	310	X8CrNi2520

La categoria degli austenitici contiene il maggior numero di tipologie di acciaio inossidabile e sono i più utilizzati in ambito industriale.

Gli austenitici possiedono una eccellente resistenza alla corrosione, superiore sia a quelle degli acciai inossidabili ferritici che quelli martensitici. Tale resistenza può essere adattata per soddisfare una vasta gamma di ambienti in cui il materiale andrà ad operare (ad esempio variando il contenuto di carbonio o di molibdeno).

Questi materiali non possono essere induriti mediante trattamenti termici, le loro proprietà meccaniche possono essere incrementate mediante lavorazione a freddo (incrudimento). L'unico trattamento termico consigliabile per questa classe di acciai è un quello di solubilizzazione del C a 1050 °C, con raffreddamento rapido per evitare la permanenza nell'area fra 800 e 400 °C, dove può avvenire la precipitazione dei carburi di cromo. La precipitazione di questi carburi, che generalmente sono Cr₂₃C₆, implica un impoverimento locale di cromo che può scendere sotto il 12%, perdendo dunque le proprietà inossidabili. La conseguenza è la possibile insorgenza di corrosione per pitting.

Sono materiali facilmente lavorabili, forgiabili e saldabili, in condizioni di totale ricottura non si magnetizzano, sono inoltre facilmente pulibili e con un ottimo coefficiente igienico.

La loro struttura austenitica (con cristallo FCC) li rende immuni dalla transizione duttile-fragile (che si manifesta invece con la struttura ferritica, cristallo BCC), quindi conservano la loro tenacità fino a temperature criogeniche (He liquido). La dimensione dei grani, sensibilmente più elevata di quella degli acciai ferritici da costruzione, li rende resistenti allo scorrimento viscoso; di conseguenza fra gli acciai per costruzione di recipienti a pressione, sono quelli che possono essere utilizzati alle temperature più elevate (600 °C).

Sebbene possiedono una eccellente resistenza alla corrosione, in alcune particolari condizioni questo fenomeno può avvenire: a bassa temperatura la resistenza alla corrosione diminuisce drasticamente, gli acidi possono rompere il film di ossido e ciò provoca corrosione generica. Nelle fessure e nelle zone protette, la quantità di ossigeno può non essere sufficiente alla conservazione della pellicola di ossido con conseguente corrosione interstiziale. Gli ioni alogenuri, specialmente i cloruri (Cl⁻) spezzano il film di ossido e provocano il pitting (particolare tipo di corrosione). La presenza di cloro può provocare anche rottura da tensocorrosione (stress corrosion cracking). [8]

Gli acciai inox austenitici sono impiegati in moltissimi settori: alimentare, chimico, edilizia e industriale in genere. Ad esempio vengono utilizzati per: serbatoi per gas liquefatti, scambiatori di calore, apparecchi di controllo dell'inquinamento e di estrazione dei fumi, autoclavi industriali, finiture architettoniche, mattatoi, servizi domestici, pentole, fabbriche di birra, lattine per bibite.

2.2.4. Gli acciai inossidabili duplex

Gli acciai inossidabili duplex hanno una microstruttura mista di austenite e ferrite. Sono costituiti da cromo (18-26%), nichel (4-7%), molibdeno (0-4%) rame e ferro. Le percentuali di cromo e nichel sono insufficienti per determinare una struttura microcristallina totalmente austenitica, che quindi rimane in parte ferritica.

Tale struttura permette a questa tipologia di materiali di avere più resistenza alla tensocorrosione rispetto agli altri acciai. Inoltre l'elevato contenuto di cromo e la presenza del molibdeno permettono un elevato grado di passivazione, conferendo un'ottima resistenza alla corrosione puntiforme (pitting).

Gli acciai duplex sono magnetici, il loro coefficiente di espansione termica è compreso tra quello degli acciai inossidabili austenitici e ferritici, sono saldabili e forgiabili e possiedono un elevato modulo elastico e un elevato sforzo di snervamento. [6]

Gli impieghi di questa tipologia di acciai sono correlati principalmente alla loro elevata resistenza alla corrosione puntiforme provocata principalmente dalla presenza di cloruri in acque salate. Sono utilizzati per serbatoi e vasche per liquidi ad alta concentrazione di cloro, refrigeratori ad acqua marina, dissalatori, impianti per salamoia alimentare ed acque sotterranee e ricche di sostanze aggressive, scambiatori di calore.

2.2.5. Acciaio 316L

L'acciaio inossidabile 316 è un acciaio di tipo austenitico. Questo tipo di acciaio, grazie alla presenza del molibdeno, è più resistente alla corrosione generalizzata e al pitting rispetto ad un acciaio convenzionale al nickel cromo come ad esempio il 304.

A causa della forte reattività con il cromo, il carbonio tende a formare dei composti di carburo di cromo che precipitano nell'acciaio ai bordi dei grani. Il cromo che forma questi carburi non contribuisce alla resistenza all'ossidazione e alla corrosione dell'acciaio che, nella zone prossime ai bordi di grano risulta soggetto a corrosione intergranulare.

Questo effetto è praticamente assente nell'acciaio 316 L (low carbon) in cui il contenuto massimo di carbonio consentito è ridotto allo 0,03%. [9]

Tabella 2.3 Proprietà dell'acciaio 316L

Densità	8,0 g/cm ³
Modulo di Young	193 GPa
Deformazione a rottura	38-55%
Durezza Rockwell B	80 HRB
Modulo di taglio	82 GPa
Calore specifico	450 J/Kg·K
Velocità del suono	150·10 ³ m/s
Sforzo massimo a rottura	610-700 MPa
Sforzo massimo a snervamento	280-510 MPa
Conduttività termica	14,6 W/m·K
Espansione termica	17 μm/m·K

2.3. Le gomme etilene-propilene

Le gomme etilene-propilene sono una delle gomme sintetiche più diffuse e in rapida crescita. Le tecnologie di polimerizzazione permettono un'ottima versatilità nella progettazione del polimero per soddisfare specifiche esigenze applicative.

Le gomme etilene-propilene grazie alla loro struttura chimica stabile, sono caratterizzate da un'eccellente resistenza al calore, all'ossidazione, all'ozono e all'invecchiamento.

Essendo elastomeri di natura non polare, possiedono una buona resistività elettrica, resistenza a solventi polari come acqua, acidi, alcali, esteri fosforici e molti chetoni ed alcoli. [11]

E' un materiale omogeneo amorfo o con un basso grado di cristallinità, la temperatura di transizione vetrosa è di circa -60 °C.

Le gomme EP possono essere reticolate con perossidi, oppure inserendo in catena un diene che permette poi la reticolazione con lo zolfo.

La gomma reticolata ha una buona resistenza a compressione in particolare ad alte temperature, eccellente resistenza all'abrasione, ritardo di fiamma. [10]

Tabella 2.4 Proprietà del polimero

Contenuto percentuale di etilene in peso	45-80
Contenuto percentuale di diene in peso	0-15
Densità [kg/m ³]	855-880

Tabella 2.5 Proprietà dopo la vulcanizzazione

Durezza [shore A]	30-95
Sforzo massimo [MPa]	7-21
Allungamento percentuale	100-600
Compressione set B percentuale	20-60

Temperatura di utilizzo °C	Da -50 a +160
Resistenza alla lacerazione	Da discreta a buona
Resistenza all'abrasione	Da buona a eccellente
resilienza	Da discreta a buona
Proprietà elettriche	Isolante

2.3.1. La composizione chimica

Le gomme EP sono costituite da catene polimeriche in cui si alternano in maniera casuale i monomeri etilene e propilene. La buona resistenza all'ambiente è dovuta all'assenza di doppi legami in catena, un composto saturo viene attaccato più difficilmente.

Il polietilene e del polipropilene sono polimeri semicristallini, invece, le gomme EP essendo copolimeri casuali, non hanno regolarità di costituzione, quindi la cristallizzazione non può avvenire e la struttura rimane amorfa.

La temperatura di transizione vetrosa è intermedia tra quella del polietilene (-100 °C) e quella del polipropilene (-10 °C).

Le gomme EP si possono reticolare con perossidi, oppure inserendo in catena un diene che permette poi la reticolazione con lo zolfo. La reticolazione che può essere di diversi gradi permette un aumento del modulo elastico e una maggiore resistenza alle alte temperature.

Se viene aggiunto un diene in catena, tali gomme sono dei terpolimeri e prendono il nome di EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer). [11]

I dieni più usati per la produzione delle gomme EPDM sono il dicitropentadiene (DCPD) e l'etilidene norbornene (ENB). Ogni diene ha una diversa tendenza all'introduzione di ramificazioni nelle catene lunghe oppure di catene laterali, questa tendenza influenza il processo e il grado di reticolazione.

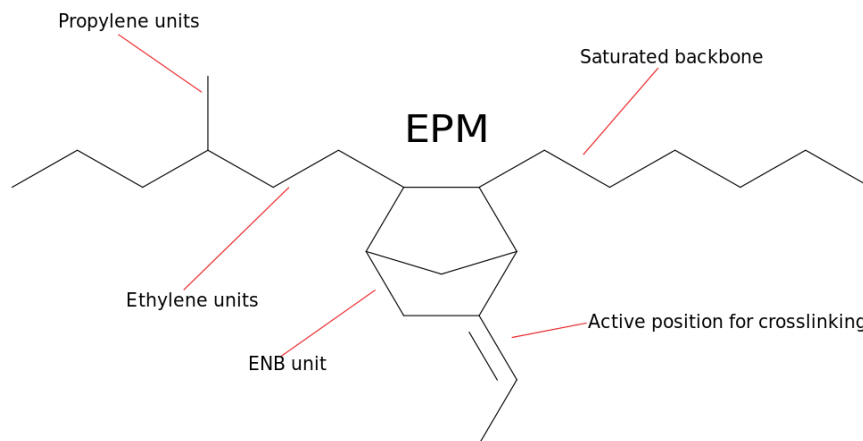


Figura 2.1 La struttura chimica delle gomme EPM

2.3.2. I campi applicativi

La gomma EPDM si usa nelle guarnizioni (per esempio si utilizza nelle porte delle celle frigorifere perché è un isolante oltre che nelle guarnizioni facciali dei respiratori industriali nei reparti automobilistici di verniciatura a spruzzo, dove deve essere evitato il silicone). L'EPDM si usa anche nei canali di scorrimento dei finestrini, nei radiatori, nei tubi di gomma per giardini ed elettrodomestici, nelle tubazioni, nei rivestimenti per laghetti, nelle lavatrici, nelle cinghie, nell'isolamento elettrico, nelle guarnizioni circolari, nei collettori di calore dei pannelli solari, nella protezione UV e negli altoparlanti conici dei sistemi surround. Si usa anche come mezzo per la resistenza all'acqua nelle giunzioni dei cavi elettrici, nelle membrane dei tetti (perché non inquina l'acqua di ruscellamento, che è di vitale importanza per la raccolta dell'acqua piovana), nelle geomembrane, nei componenti meccanici di gomma, e in molte altre applicazioni. I granuli colorati di EPDM sono mescolati con leganti in poliuretani e spazzolati o spruzzati su cemento, asfalto, schermi, mattoni a incastro, legno ecc., per creare una superficie non scivolosa, morbida, porosa per aree con pavimenti umidi come quelli delle piscine e per la pavimentazione di sicurezza sotto le attrezzature dei campi da gioco (progettata per aiutare a ridurre le lesioni da caduta).

L'utilizzo più comune, però, è probabilmente nei veicoli. Si adopera nelle guarnizioni di porte, finestrini e bagagliai, e a volte anche in quelle dei parabrezza. Frequentemente queste stesse guarnizioni sono fonte di rumore a causa del movimento della porta contro il corpo dell'auto e dell'attrito risultante tra la gomma EPDM e la superficie accoppiata (la lamiera dipinta o il vetro dell'auto). Questo inconveniente può essere attenuato usando speciali rivestimenti applicati al momento della fabbricazione della guarnizione di tenuta. Tali rivestimenti possono anche aumentare notevolmente la resistenza della gomma EPDM. Altri impieghi nei veicoli includono i manicotti di gomma del circuito di raffreddamento dove pompe, termostati, valvole e refrigeratori di ricircolo dei gas esausti, impianti di riscaldamento, refrigeratori dell'olio, radiatori sono collegati con manicotti di EPDM; inoltre il materiale si ritrova nei tubi dell'aria di alimentazione sui motori turbocompressi che collegano il lato freddo dell'impianto di raffreddamento dell'aria di alimentazione (intercooler) al collettore di alimentazione. [10] [11]

2.4. Le resine epossidiche

Tra le resine termoindurenti, le epossidiche sono le più usate grazie alle loro proprietà di resistenza all'umidità, resistenza chimica ed ottime proprietà adesive. Generalmente per resina epossidica si intende una miscela di sostanze che comprendono componenti epossidici primari, diluenti, agenti reticolanti, flessibilizzanti, catalizzatori e acceleranti. Il componente epossidico primario è costituito da un oligomero epossidico alifatico o aromatico.

Il reagente principale è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici (Figura 2.2), anelli composti da un atomo di ossigeno e da due atomi di carbonio:

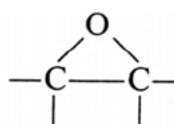


Figura 2.2 Il gruppo epossidico

Queste sostanze possono, ad esempio, essere prodotte per reazione di epiclorigrina con composti amminici o acidi del bisfenolo A. Una tipica reazione di sintesi del prepolimero epossidico è la seguente (Figura 2.3):

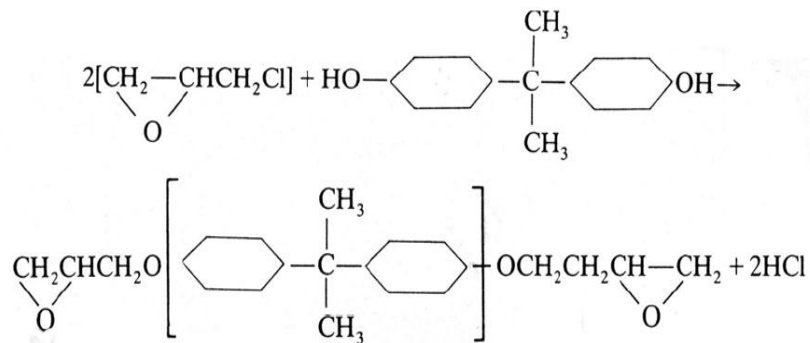


Figura 2.3 Prepolimero epossidico

La sostanza organico ottenuta è di solito un fluido viscoso, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione.

A questa miscela, che costituisce il reagente principale in termini di composizione, viene aggiunto un agente reticolante (di solito un'ammina) che deve possedere almeno due siti reattivi. Un agente reticolante molto usato è la dietilentriammina (Figura 2.4):



Figura 2.4 Dietilentriammina

La reazione è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica del materiale reticolato è la seguente (figura 2.5):

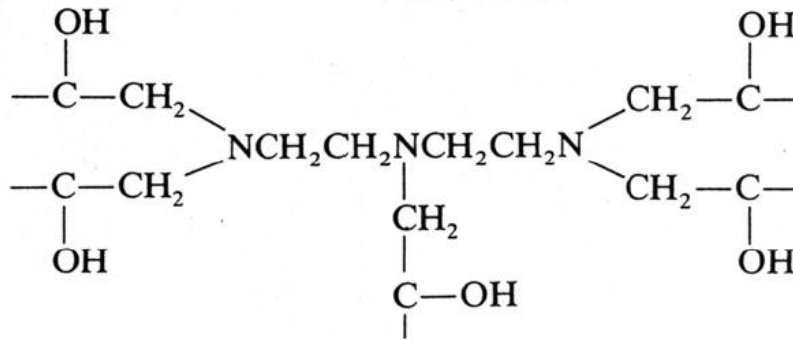


Figura 2.5 Epossido reticolato

La struttura chimica della resina può essere variata a piacere in base alla composizione chimica del prepolimero epossidico. La densità di reticolazione dipende dalla percentuale e dalla natura dell'agente reticolante.

Le resine epossidiche più comunemente utilizzate per materiali compositi sono il diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA) (Figura 1.5) per temperature di esercizio moderate (< 120°C) e l' N-N' tetraglicidil 4-4' diamminodifenilmetano (TGDDM) (Figura 1.6) per elevate temperature di esercizio. L'agente reticolante più comunemente utilizzato con il TGDDM è il 4-4 diamminodifenilsulfone (DDS) (Figura 2.6). [13]

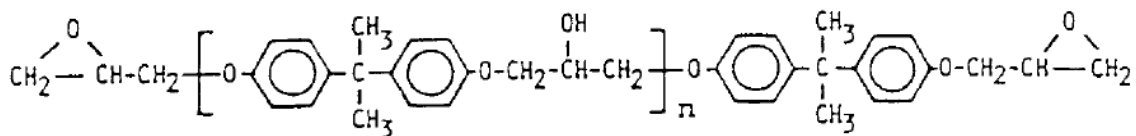


Figura 2.6 Diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA)

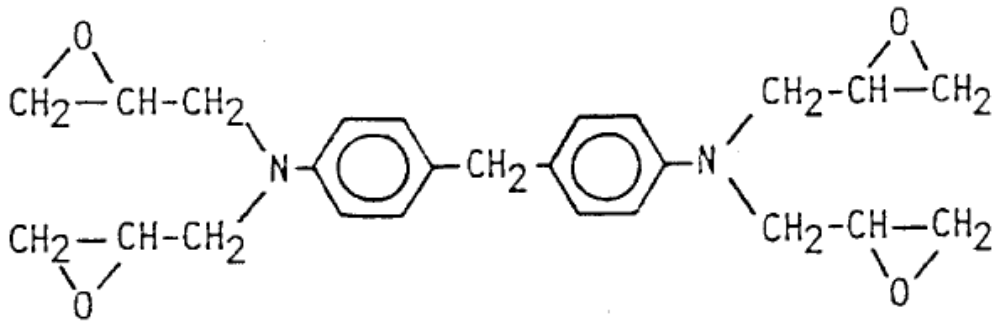


Figura 2.7 - *N-N'* tetraglicidil 4-4' diamminodifenilmetano (TGDDM)

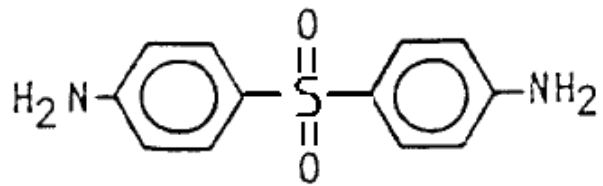


Figura 2.8 4-4' diamminodifenilsulfone (DDS)

Il legame epossido è caratterizzato da elevata reattività poiché, essendo l'anello in forte tensione, ha tendenza ad aprirsi e a reagire: il gruppo epossidico potrà quindi legarsi chimicamente ad altre molecole, gli agenti reticolanti, per andare a formare una rete tridimensionale. Durante questo processo di reticolazione (curing) la resina passa da liquido viscoso a solido elastico. La maggior parte delle sostanze usate come reticolanti delle resine epossidiche sono ammine bifunzionali o polifunzionali le cui strutture includono gruppi reattivi alle estremità e consentono, di conseguenza, la formazione di reticoli con le molecole contenenti gruppi epossidici. Al fine di ottenere reticolazione ottimale, gli idrogeni appartenenti alle ammine primarie e secondarie dovrebbero essere mantenuti in rapporto 1:1 con i gruppi epossidici contenuti nella miscela.

In aggiunta all'eossido e alla diammina spesso in miscela vi sono anche altri additivi che permettono di conferire al prodotto particolari caratteristiche finali o facilitano la lavorazione dello stesso: i plastificanti, come ad esempio l'alcol benzilico, che abbassandone la T_g ne semplifica la lavorabilità, anche se può ridurre alcune caratteristiche meccaniche del composito finale. [12]

2.5. Metodo di produzione del materiale composito a sandwich oggetto dello studio

Il materiale a sandwich oggetto dello studio è stato fornito e prodotto dall'istituto di metallurgia del Clausthal University of Technology (TUC).

Il materiale prodotto in laboratorio usando il processo roll-bonding (RB).

Il roll-bonding è un processo continuo e può essere diviso in due step: nel primo, i fogli di metallo, dopo essere stati sgrassati e puliti con acetone, vengono ricoperti con uno strato di resina epossidica; per attivare l'adesivo, vengono inseriti in forno a $265 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ per 180 secondi.

Contemporaneamente, il foglio di poliolefina viene inserito in un secondo forno alla temperatura di $120 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ anch'esso per 180 secondi.

Dopo l'attivazione, un foglio di metallo e il foglio di poliolefina vengono uniti con l'utilizzo di un laminatoio da 12".

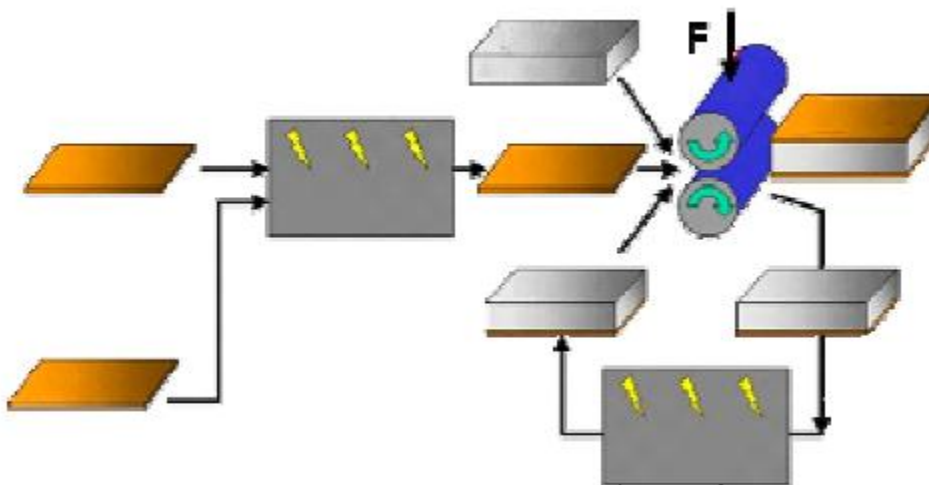


Figura 2.8 Processo produttivo del materiale a sandwich

Durante il secondo step, il semi-sandwich viene unito al secondo foglio di metallo.

Nel corso del processo di laminazione, il foglio di materiale polimerico viene deformato elasticamente e plasticamente, si ottiene così uno spessore finale di 0,5 mm.

Al fine di migliorare l'adesione tra i vari strati del materiale composito, possono essere utilizzati dei trattamenti superficiali sui fogli di metallo e quello polimerico, i

trattamenti corona e plasma, come descritto nel seguito, sono risultati efficaci a tale scopo.

2.6. Metodi di trattamento delle superfici

2.6.1. L'energia superficiale

In ambito industriale è spesso necessario legare materie plastiche a metalli o ad altre materie plastiche, o semplicemente stampare su una superficie plastica. Affinché ciò si realizzi con successo, il liquido adesivo o l'inchiostro dovrebbero essere in grado di bagnare la superficie del materiale. La bagnabilità dipende da una specifica proprietà della superficie: l'energia superficiale, spesso indicata come tensione superficiale.[13] L'energia di superficie, come la tensione superficiale, viene misurata in mN/m. L'energia superficiale del substrato solido influenza direttamente la capacità di un liquido di bagnare la superficie. La bagnabilità, a sua volta, è facilmente dimostrabile da misure dell'angolo di contatto. L'angolo di contatto è l'angolo tra la linea tangente nel punto di contatto e la linea orizzontale della superficie solida. Quando una goccia di liquido si trova su una superficie orizzontale solida liscia, si può espandere sul substrato e l'angolo di contatto si avvicinerà a zero se avviene una bagnatura completa. Viceversa, se la bagnatura è parziale, l'angolo di contatto risultante raggiunge l'equilibrio nel range da 0 a 180 gradi.



Figura 2.9 Angolo di contatto

La figura illustra la differenza tra la scarsa e la buona bagnabilità. Il liquido si dispone in modo da minimizzare l'energia libera totale delle superfici, maggiore è l'energia superficiale del substrato solido rispetto alla tensione superficiale del liquido, migliore è la sua bagnabilità, e minore è l'angolo di contatto. Affinché esista un adeguato legame tra il liquido e la superficie del substrato, l'energia superficiale del substrato deve superare la tensione del liquido di circa 2-10 mN/m. Tale fenomeno è spiegato dall'equazione di Young (2.1) che descrive la condizione di equilibrio:

$$\gamma_{lg} \cos \theta = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad (2.1)$$

Dove γ_{lg} e γ_{sg} sono rispettivamente le energie superficiali del liquido e del solido, mentre γ_{sl} è l'energia interfacciale tra solido e liquido. [14]

Tabella 2.6 Energia superficiale

materiale	Energia superficiale
PTFE	< 20
Silicone	< 20
PP	30
PE	32
PS	34
PC	34
ABS	34

La tabella mostra i valori assoluti di energia superficiale di materiali solidi e la tensione superficiale di molte materie plastiche, tali valori sono spesso troppo bassi per l'incollaggio o la stampa.

Il trattamento di superficie può migliorare la bagnabilità del materiale alzando l'energia superficiale del materiale e influenzando positivamente le caratteristiche adesive con la creazione di siti di legame. I più avanzati ed efficaci metodi di trattamento di superficie sono basati su un principio di scarica ad alta tensione in aria. [17]

2.6.2. Trattamento plasma e corona

Il plasma è considerato il quarto stato della materia che si distingue quindi dal solido, il liquido e l'aeriforme, fu identificato dal Sir William Crookes nel 1879 e chiamato "plasma" da Irving Langmuir nel 1928. Le ricerche di Crookes portarono alla realizzazione dei cosiddetti tubi di Crookes, che erano gli antenati dei tubi catodici e delle lampade al neon.

Il plasma è un gas ionizzato costituito da un insieme di elettroni e ioni e la carica elettrica totale è nulla. Grazie alla sua composizione è un buon conduttore di elettricità e risponde fortemente ai campi elettromagnetici. [16]

Esistono diversi metodi per la generazione di plasma, tuttavia hanno un principio comune: bisogna immettere energia per produrre e sostenere il plasma. Viene generato il plasma quando viene applicata una corrente elettrica attraverso in gas o un fluido dielettrico (un materiale non conduttore di elettricità).

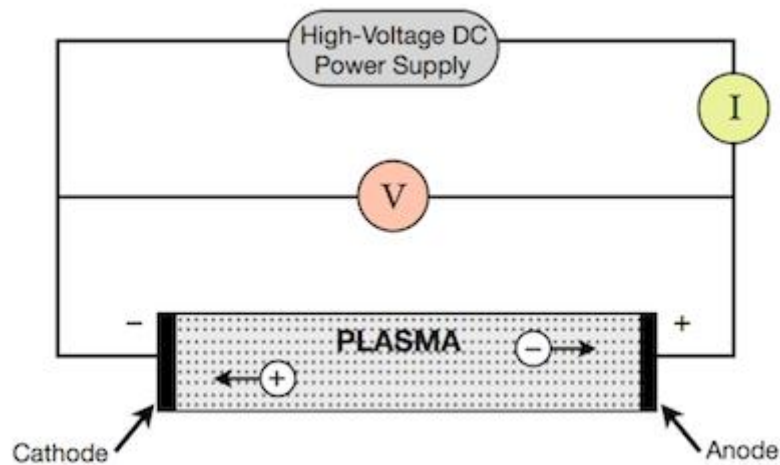


Figura 2.9 La generazione del plasma

La differenza di potenziale che si crea attira gli elettroni di legame verso l'anodo (elettrodo positivo), mentre i nuclei verso il catodo (elettrodo negativo). Incrementando il voltaggio, la polarizzazione elettrica stressa il materiale fino al di sopra del suo limite dielettrico, e il materiale passa da isolante a conduttore.

La scarica corona è un processo tramite il quale una corrente passa da un elettrodo con un elevato potenziale in un fluido neutro, solitamente aria, il fluido viene così ionizzato e si crea del plasma nella zona intorno all'elettrodo. Gli ioni generati trasferiscono la carica alle zone circostanti a potenziale inferiore o si ricombinano a formare molecole di gas neutro. Quando il campo elettrico è abbastanza grande in un punto del fluido, il fluido in quel punto ionizza e diventa conduttivo. Se un oggetto carico ha un punto acuminato, la forza del campo elettrico intorno a quel punto sarà molto più alta che altrove. L'aria vicino all'elettrodo può essere ionizzata (parzialmente conduttiva), quando l'aria in prossimità del punto diventa conduttiva, ha l'effetto di aumentare la dimensione apparente del conduttore. Dal momento che la nuova regione conduttiva è meno appuntita, la ionizzazione non può protrarsi oltre questa regione. Al di fuori di questa regione di ionizzazione e di conducibilità, le particelle cariche si combinano con cariche opposte e vengono lentamente neutralizzate. Se la geometria e il gradiente sono tali per cui la regione ionizzata continua a crescere fino a raggiungere un altro conduttore ad un potenziale più basso, si formerà un percorso conduttivo a bassa resistenza tra i due: un arco elettrico. [17]

La scarica corona di solito si forma nelle zone degli elettrodi con elevata curvatura, come spigoli vivi, punti di protezione, bordi di superfici metalliche, o fili di piccolo diametro.

La scarica corona può essere positiva o negativa in base alla polarità della tensione sull'elettrodo con elevata curvatura. Se l'elettrodo curvo è positivo rispetto all'elettrodo piatto ha una corona positiva, se è negativo ha una corona negativa. Una corona negativa genera molto più ozono rispetto a una corona positiva.

Materiali come polimeri, tessuti, carta, possono essere fatti passare attraverso il plasma corona con lo scopo di aumentare l'energia superficiale del materiale e aumentarne la bagnabilità. A differenza del trattamento al plasma, quello corona avviene a temperatura più bassa.

In presenza di una scarica ad alta tensione in un vuoto d'aria, gli elettroni liberi, che sono sempre presenti nell'aria, accelerano e ionizzano il gas. Quando la scarica elettrica è molto forte, le collisioni di elettroni ad alta velocità con le molecole di gas non

provocano alcuna perdita di quantità di moto, e si verifica una cascata di elettroni. [16] Quando viene inserita una parte in plastica nel percorso di scarica, gli elettroni generati con la scarica urtano la superficie con un'energia da 2 a 3 volte superiore a quella necessaria per rompere i legami molecolari della maggior parte dei substrati. Questo crea radicali liberi molto reattivi. Questi radicali liberi possono reagire velocemente in presenza di ossigeno per formare vari gruppi funzionali sulla superficie del substrato. I gruppi funzionali derivanti da questa reazione di ossidazione sono i più efficaci nell'aumentare l'energia superficiale e nel migliorare l'adesione chimica alla matrice di resina. Questi includono i gruppi: carbonile (C = O), carbossile (HOOC-), idroperossido (HOO-) e idrossile (HO-). Il trattamento superficiale con scarica ad alta tensione modifica solo le caratteristiche superficiali del materiale, senza influenzarne le proprietà al di sotto dello strato superficiale.

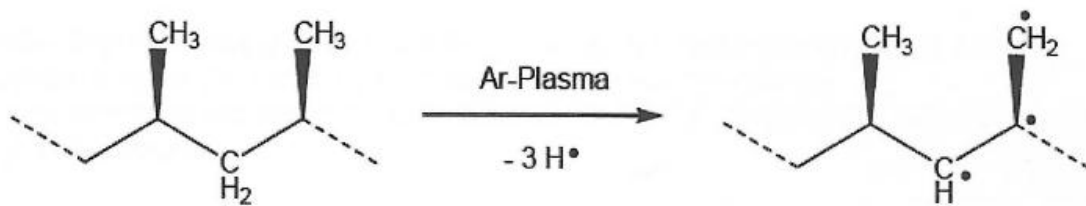


Figura 2.10

I radicali reagiscono con l'ossigeno atmosferico (figura 2.11) e formano gruppi idrofilici che aumentano la bagnabilità della superficie

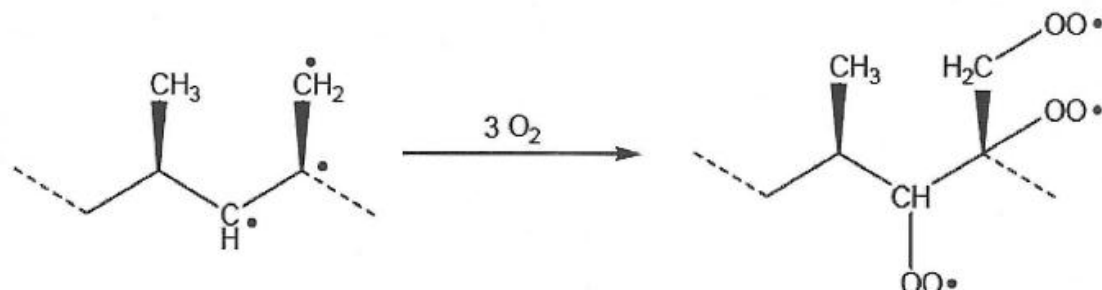


Figura 2.11

I gruppi ossidrilici e carbossilici sono introdotti dall'aumento dell'idrofilia della superficie. Il perossido reagisce con l'idroperossido per formare gruppi carbonilici e ossidrilici. [15]

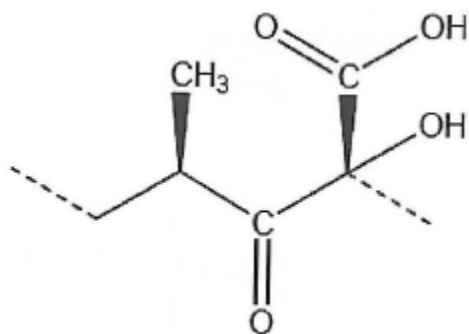


Figura 2.12

Capitolo 3. La termografia IR

Storicamente, nelle analisi meccaniche dei materiali si sono effettuate prove statiche o dinamiche in cui gli unici parametri rilevati sono stati lo sforzo e la deformazione.

Attualmente, l'analisi termografica permette di tenere conto anche della variazione di temperatura, che è un parametro legato all'energia del sistema in esame.

E' possibile rilevare l'andamento della temperatura sulla superficie del provino durante tutta l'esecuzione della prova, e al termine della stessa comparare i dati ottenuti con quelli di sforzo e deformazione.

Tale analisi permette, per esempio, in un componente meccanico soggetto ad uno stato di sforzo di prevedere il punto in cui avverrà la rottura, individuando il punto sulla superficie a temperatura più elevata. In alcune applicazioni tale analisi risulta molto vantaggiosa perché può essere eseguita a distanza.

Negli ultimi anni si è sviluppato un grande interesse sull'argomento: tanti ricercatori hanno utilizzato l'analisi superficiale della temperatura sul provino per proporre metodologie e procedure per determinare sperimentalmente e in modo rapido il limite di fatica, altri ricercatori hanno studiato la correlazione tra l'energia necessaria a portare a rottura il materiale e la temperatura superficiale. [18]

3.1. Effetto termoelastico

3.1.1. Introduzione

L'effetto termoelastico consiste nella variazione di temperatura che si verifica quando questo è deformato in campo elastico.

La variazione di temperatura è correlata alla variazione di volume specifico che si ha in campo elastico.

Nelle zone sollecitate a trazione dove il volume specifico aumenta, si ha una diminuzione di temperatura, mentre nelle sezioni sollecitate a compressione, con una riduzione di volume specifico, si osserva un aumento di temperatura. Nel caso di taglio puro (volume costante) non si riscontrano variazioni di temperatura.

Si tratta dello stesso fenomeno che caratterizza in maniera più evidente i gas, mentre nei solidi elastici tale variazione è solo dell'ordine dei centesimi di grado kelvin.

Una condizione necessaria affinché si manifesti l'effetto termoelastico, è che il carico sia applicato in modo dinamico. Si considera quindi una trasformazione adiabatica (senza trasmissione di calore).

Se il carico fosse applicato in modo quasi statico, la trasmissione di calore con l'ambiente esterno impedirebbe il manifestarsi di tale fenomeno.

Nel caso di deformazione elastica, la variazione di temperatura è reversibile, mentre nel caso di deformazione plastica, non si ha reversibilità. La variazione in campo plastico è chiamata effetto termoplastico, tale effetto si somma a quello termoelastico. [19]

3.1.2. La teoria dell'effetto termoelastico

L'effetto termoelastico è descritto dalla seguente relazione che quantifica la variazione di temperatura in funzione delle tensioni all'interno del materiale

$$dT = \frac{T}{\rho \cdot c_v} \cdot \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} d\varepsilon_{ij} + \frac{\delta q}{c_v} \quad (3.1)$$

Dove:

T: temperatura del corpo

ρ : densità

c_v : calore specifico a volume costante

δq : calore scambiato con l'ambiente

σ_{ij} : sforzo

ε_{ij} : deformazione

Se consideriamo un materiale isotropo sollecitato in campo elastico lineare, allora si può utilizzare la legge di Hooke per correlare gli sforzi con le deformazioni. [20]

Se consideriamo il modulo di Young E , il coefficiente di Poisson ν , ed il coefficiente di espansione termica lineare α indipendenti dalla temperatura, si ottiene la seguente equazione che mette in relazione la variazione di temperatura dT e la variazione di volume $d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$.

$$dT = -\frac{T \cdot \gamma}{\rho \cdot c_v} \cdot d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{\delta q}{c_v} \quad (3.2)$$

Dove: $\gamma = \frac{E}{1-2\nu} \alpha$

Se non avvengono scambi di calore con l'ambiente, il processo è adiabatico: $\delta q=0$

$$dT = -\frac{T \cdot \gamma}{\rho \cdot c_v} \cdot d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (3.3)$$

Se indichiamo con T_0 la temperatura iniziale:

$$\Delta T = -\frac{\gamma}{\rho \cdot c_v} \cdot T_0 \cdot \Delta(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (3.4)$$

Se si vuole ottenere la variazione di temperatura in funzione dello stato di sforzo, bisogna considerare che secondo la legge di Hooke:

$$\Delta(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) = \Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \frac{1-2\nu}{E} + 3\alpha \Delta T \quad (3.5)$$

Inoltre, considerando lo stato di sforzo, viene utilizzato il calore specifico a pressione costante C_p al posto di quello a volume costante C_v

$$C_v = C_p - \frac{3E\alpha^2 T}{\rho(1-2\nu)} \quad (3.6)$$

Sostituendo la 3.5 e la 3.6 nella 3.4 si ottiene:

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho \cdot c_p} \cdot T_0 \cdot \Delta(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.7)$$

Tramite tale relazione è possibile ricavare l'invariante lineare delle tensioni misurando la variazione di temperatura del corpo. Si osserva che tale relazione è di tipo lineare, quindi i punti a temperatura costante sono anche punti nei quali è costante la somma delle tensioni principali ($\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$).

La temperatura viene misurata sulla superficie, dove $\sigma_z = 0$, si ottiene quindi:

$$\Delta T = -K_0 \cdot T_0 \cdot \Delta(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.8)$$

Dove $K_0 = \frac{\alpha}{\rho_0 c_p} \left[\frac{m^2}{N} \right]$ è la costante termoelastica.

Essendo in genere il coefficiente di dilatazione termica lineare α positivo, si deduce che in trazione (sforzo positivo) si ha un ΔT negativo (raffreddamento), mentre in compressione si ottiene un aumento di temperatura. [19]

3.2. Misurazione della temperatura

Per ottenere una mappatura degli sforzi sul campione, è necessario rilevare la temperatura su tutta la superficie del campione, non possono quindi essere utilizzati strumenti del tipo a contatto, come termocoppie o altri sensori, perché forniscono solamente valori puntuali.

Vengono utilizzati termografi differenziali ad infrarosso che permettono di effettuare misurazioni sull'intera superficie del campione con metodo non a contatto.

Tali termografi sono in grado di misurare la variazione di temperatura piuttosto che la temperatura assoluta

La misurazione avviene per mezzo di trasduttori fotovoltaici che sono sensibili all'energia irradiata dai corpi nel campo dell'infrarosso.

L'energia ricevuta dal sensore nella banda di lunghezze d'onda dove esso è attivo è data da:

$$\Phi = eBT_0^3 \quad (3.9)$$

Dove:

e : emissività della superficie del campione

B : costante dipendente dall'intervallo di lunghezze d'onda considerato

T_0 : temperatura assoluta

Derivando l'espressione precedente si ottiene la variazione di energia legata alla variazione di temperatura:

$$\Delta\Phi = 3eBT_0^2\Delta T \quad (3.10)$$

I termografi impiegati non forniscono direttamente la variazione di energia, ma una grandezza S ad essa proporzionale data da:

$$\hat{S} = \frac{1}{(D \cdot R \cdot F)} \cdot \Delta\Phi \quad (3.11)$$

Dove:

D : rapporto tra il flusso di energia che arriva al sensore ed il segnale generato in uscita alla temperatura di riferimento

R : termine correttivo di D (se la temperatura è diversa da quella di riferimento)

F : fattore di amplificazione

Si ricava:

$$\Delta(\sigma_x + \sigma_y) = A \cdot \hat{S} \quad (3.12)$$

$$\text{Con } A = -\frac{(D \cdot R \cdot F)}{3eBK_0 \cdot T_0^3}$$

Dove A rappresenta il fattore di calibrazione.

3.3. Preparazione della superficie

La relazione 3.12 mostra che il segnale termoelastico è direttamente proporzionale all'emissività della superficie. Generalmente il valore di emissività delle superfici metalliche è molto basso e può variare in modo significativo tra un punto e l'altro della superficie, inoltre la superficie metallica può riflettere i segnali provenienti dall'ambiente circostante.

La soluzione è l'applicazione di una vernice opaca ad alta emissività (valori in genere compresi tra 0,9 e 0,95). Inoltre una buona vernice deve avere una bassa costante termoelastica e possedere una buona conducibilità termica per garantire la migliore corrispondenza tra la temperatura rilevata in superficie e quella dello strato metallico sottostante. Per lo stesso motivo la vernice deve essere applicata in modo uniforme e con il minor spessore possibile. [19]

3.4 Sistemi di acquisizione del segnale

Ad oggi sono stati sviluppati e commercializzati due sistemi di acquisizione del segnale termoelastico, basati sulla tecnologia ad infrarossi: Lo SPATE (realizzato in UK nel 1982 dalla Ometron Ltd) ed il Deltatherm (realizzato in USA nel 1994 dalla StressPhotonics Inc.).

3.4.1. Sistema SPATE

Lo SPATE “Stress Pattern Analysis by Thermal Emission” ha un unico sensore CMT (cadmio-mercurio-tellurio), operante nella banda di lunghezze d’onda compresa tra 8 e 12 μm ed è sensibile a variazioni di temperatura dell’ordine di 0,001 °K.

A monte del sensore è collocato un sistema ottico composto da specchi fissi e specchi orientabili comandati da un motore. In questo modo il segnale termoelastico proveniente dai diversi punti della superficie del corpo in esame viene focalizzato sul sensore.

La rotazione minima consentita dal motore e la distanza dalla superficie in esame determinano la minima distanza tra due punti di misura adiacenti (risoluzione spaziale).

Il numero di misurazioni che si possono effettuare dipende dal modello, si arriva al massimo a 512 x 512.

Il sensore è raffreddato con azoto liquido, tale sistema permette un’autonomia di un paio di ore.

Dopo che il segnale è stato correlato con il segnale di riferimento nell’unità di correlazione, esso è inviato in un convertitore A/D, dove il segnale viene digitalizzato, e quindi memorizzato su supporti magnetici o ulteriormente elaborato per ottenere ad esempio le mappe delle isopache sull’intera regione o i diagrammi del segnale termoelastico lungo una linea.

3.4.2. Sistema DeltaTherm

Il sistema DeltaTherm è basato una matrice di sensori (Focal Plane Array, FPA). Al contrario dello SPATE, tutti i sistemi FPA non hanno bisogno quindi del sistema di specchi mobili per il rilievo a campo intero del segnale.

L’acquisizione avviene contemporaneamente sulla matrice di sensori che rilevano il segnale termoelastico a campo intero riducendo i tempi complessivi di acquisizione a

pochi secondi, con un miglioramento di ben due ordini di grandezza rispetto allo SPATE.

La risoluzione geometrica della scansione sulla superficie analizzata, dipende dal numero di pixels che compone la matrice di sensori della distanza della termocamera dalla superficie del provino in esame. E' disponibile un set di diverse lenti che consente di mettere a fuoco il segnale su ogni pixel da pochi centimetri a parecchi metri.

Come per lo SPATE anche i sensori DeltaTherm hanno la necessità di operare alla temperatura criogenica. Il sistema di raffreddamento dei primi modelli era realizzato mediante l'impegno di azoto liquido. Gli ultimi modelli invece impiegano un ciclo frigorifero che mantiene la matrice di sensori alla temperatura criogenica. [19]

3.5. La termografia IR applicata alle prove a fatica

Durante l'esecuzione di prove a fatica, monitorando la temperatura superficiale, si è osservato che la temperatura media del punto più caldo, dopo un primo veloce incremento (N_s qualche migliaio di cicli) si stabilizza fino a un veloce incremento finale (N_f ancora qualche migliaio di cicli) che porta al cedimento del provino.

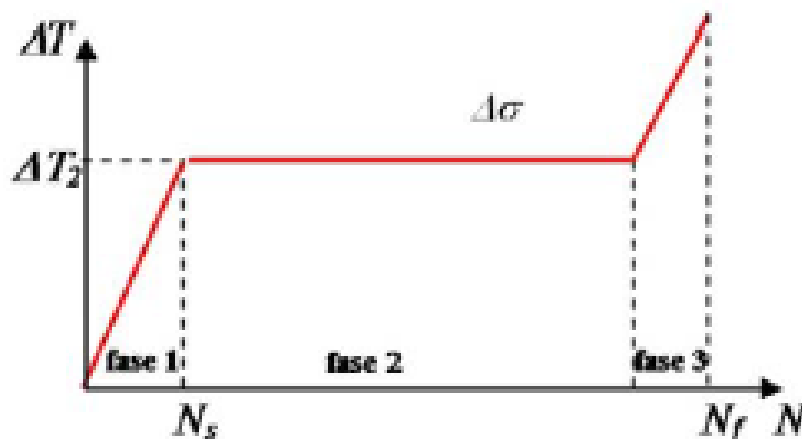


Figura 3.1 variazione del ΔT in funzione del numero di cicli nelle prove a fatica

Da tale osservazione si è capito che la durata di un componente può essere stimata dall'energia necessaria per il raggiungimento della rottura, e l'energia è proporzionale alla temperatura.

Considerando il sistema chiuso, e applicando il primo principio della termodinamica si può affermare che l'energia interna è data dalla differenza tra il lavoro fornito al sistema e il calore ceduto all'ambiente circostante. Nel caso in esame il lavoro W fornito al sistema è dato dalla somma di una componente elastica W_e e di una componente plastica W_p .

La componente elastica è regolata dalla legge termoelastica, ed è inferiore alla componente plastica.

Si può scrivere l'equazione di equilibrio tra l'energia meccanica fornita in termini elastici e plastici e il calore dissipato:

$$\beta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p + K \nabla^2 T + (3\lambda + 2\mu) \alpha T_0 \dot{\varepsilon}^e = \rho c_e \dot{T} \quad (3.16)$$

Dove:

β : frazione di potenza termica rilasciata sulla potenza meccanica trascurando la componente termoplastica.

K : conduttività termica

T : temperatura

λ e μ : costanti di Lamè

α : coefficiente di dilatazione termica

La componente plastica del lavoro meccanico è data da:

$$W^p = \int_0^T \sigma d\varepsilon^p \quad (3.17)$$

\dot{W}^p è quindi pari al prodotto della componente deviatorica dello sforzo per l'incremento della deformazione plastica valutato su un ciclo.

Utilizzando le frequenze tipiche dei test effettuati, si può approssimare il sistema come adiabatico, inoltre per i materiali comunemente adottati in campo meccanico (acciaio e ghisa) β si può considerare costante con un valore di circa 0,9.

Con tali assunzioni il bilancio di calore assume la seguente forma:

$$\beta \dot{W} = \rho c_E \dot{T} \quad (3.18)$$

Durante le prove di fatica si osserva che l'aumento di temperatura sulla superficie del provino avviene quando viene superato il limite di fatica in quel punto.

La temperatura è proporzionale all'energia meccanica liberata durante la deformazione, in particolare quella che si genera quando avviene la plasticizzazione. La variazione di temperatura che si ottiene durante la risposta elastica del materiale, essendo molto più piccola rispetto a quella relativa al campo plastico, viene trascurata.

Nel punto in cui avviene la prima plasticizzazione locale, inizia il processo di cedimento che porterà alla rottura quando viene raggiunto il limite di energia E_1 quel dato componente.

Sperimentalmente si osserva che il parametro energetico Φ (integrale nel tempo della variazione di temperatura ΔT rilevata nel punto più caldo, preso come riferimento) risulta costante per valori diversi di sollecitazione.

Si deduce che l'energia limite E_1 per provocare la rottura del componente è proporzionale al parametro energetico e quindi alla quantità di calore ceduto.

Essendo l'energia limite una costante caratteristica del materiale, è possibile determinare la classica curva di Wohler (tensione - numero di cicli) dalla conoscenza del parametro ΔT .

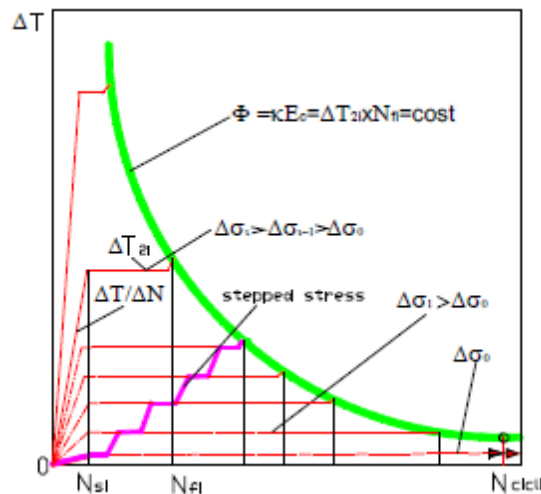


Figura 3.2 Parametro energetico Φ costante per storie di carico diverse

Il diagramma di Wohler illustra il comportamento a fatica dei materiali ponendo in relazione l'ampiezza di sforzo con il numero di cicli al quale si verifica la rottura del materiale. Se il diagramma viene posto in forma doppio logaritmica, le regioni che si distinguono sono:

- La I dove si ha la rottura per un numero di cicli molto basso e sollecitazioni molto elevate. In genere questa zona è limitata con $N = 10^3$ e la resistenza è data dalla sollecitazione di rottura;
- La II dove gli sforzi applicati sono inferiori ma si verificano ancora delle rotture. In genere questa zona è compresa tra $N = 10^3$ e il numero di cicli in corrispondenza al quale si ha il limite di fatica. In questa regione il legame tra gli sforzi e le durate è di tipo esponenziale: $\sigma^m N = \text{cost}$;
- La III dove le sollecitazioni sono inferiori ad un valore di sforzo definito come limite di fatica e non si verificano rotture. [20]

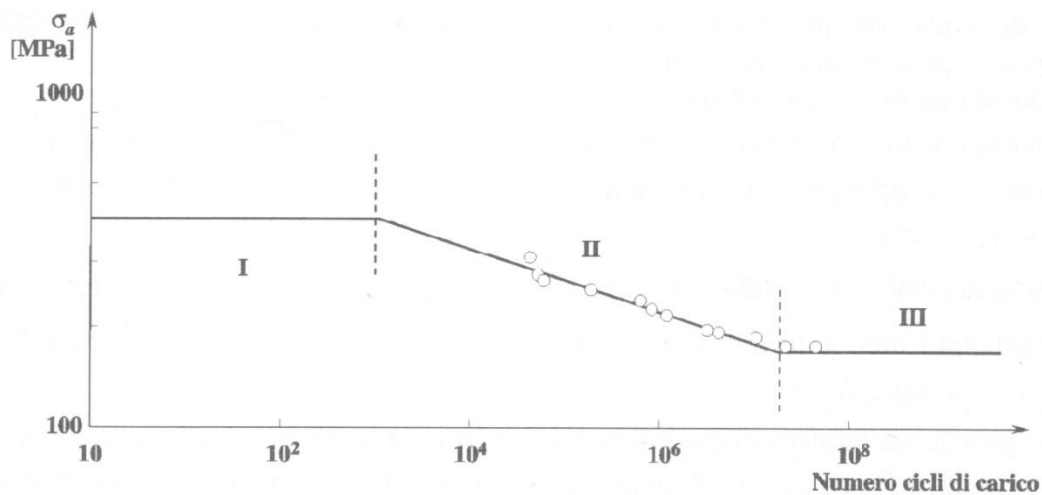


Figura 3.3 Diagramma di Wohler in scala doppio logaritmica

3.6. La termografia IR applicata alle prove statiche a trazione

La prova di trazione è di fondamentale importanza nella caratterizzazione dei materiali. I risultati di tale test sono utilizzati per la selezione dei materiali, per il controllo di qualità, per verificare il comportamento di un componente sottoposto ad uno sforzo-deformazione uniassiale.

Le proprietà del materiale che si possono rilevare con questo test sono: lo sforzo di rottura, l'allungamento massimo a rottura, la riduzione di area, il modulo di Young, lo sforzo di snervamento.

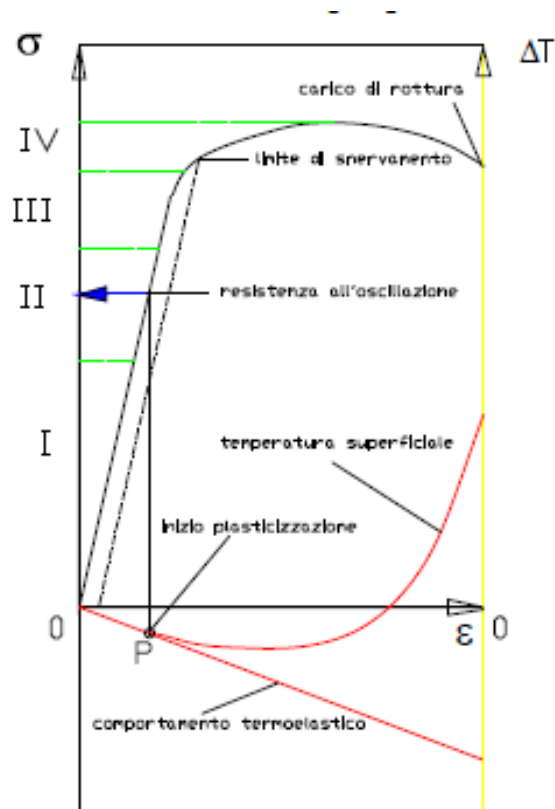


Figura 3.4 Andamento di sforzo e temperatura in una prova di trazione uniassiale

3.6.1. Curva sforzo-deformazione

Prendendo ad esempio il grafico sforzo-deformazione risultante da una prova di trazione uni assiale di un provino metallico, si possono individuare cinque zone in funzione della risposta del materiale alla sollecitazione:

- 1) sforzi ridotti, tutti i cristalli risultano stressati entro il loro campo elastico
- 2) la maggior parte dei cristalli sono deformati in modo elastico, tuttavia, in alcuni cristalli sono presenti deformazioni plastiche accoppiate a quelle elastiche. Allo scarico il provino riprende ancora la forma iniziale.

- 3) In alcuni cristalli le deformazioni plastiche sono preponderanti su quelle elastiche e quando il provino viene scaricato i cristalli deformati elasticamente non hanno energia per riportare il provino nelle condizioni iniziali
- 4) La maggior parte dei cristalli risulta deformata plasticamente e con l'aumentare del carico i cristalli ancora deformati elasticamente risultano sempre meno e le deformazioni residue dopo la cessazione del carico risultano sempre maggiori.

Lo sforzo di snervamento è quello di transizione tra la fase 2) e la fase 3), cioè quando si ha la prima deformazione permanente dopo lo scarico.

3.6.2. Variazione della temperatura superficiale durante la prova

Analizzando il comportamento termico del materiale durante la prova uniassiale di trazione si possono distinguere due fasi:

- 1) Il materiale si deforma elasticamente in tutti i punti (zona I del diagramma in figura), in cui vi è una relazione lineare tra sforzo e deformazione
- 2) In qualche punto del materiale iniziano deformazioni plastiche permanenti

La temperatura del materiale nella prima fase è regolata dalla teoria della termoelasticità.

Nel caso di materiali isotropi vale la seguente formula:

$$\Delta T = -K_m T \Delta I \quad (3.19)$$

Dove ΔI è la variazione della somma delle tensioni principali e K_m è la costante termoelastica del materiale.

Durante la prova di trazione uni assiale, ΔI coincide con lo sforzo medio σ_m applicato, quindi si ottiene:

$$\Delta T = -K_m T \sigma_m \quad (3.20)$$

In questa fase c'è proporzionalità tra la tensione applicata e l'incremento di temperatura rispetto alla temperatura iniziale (ambiente).

Effettuando una prova di trazione su di un provino isotropo, e monitorando la temperatura superficiale per mezzo di una termocamera, si osserva un andamento lineare della temperatura all'aumentare del carico applicato.

Quando in un qualsiasi punto del materiale si raggiungono tensioni locali tali da creare plasticizzazione, in tale punto il comportamento termico non è più regolato dalla teoria della termoelasticità, le deformazioni plastiche producono calore che nell'ipotesi di plasticizzazione ideale è pari a $dQ = \sigma_p d\varepsilon_p$.

C'è quindi una parte di volume che segue la legge termo elastica e una parte che produce calore, aumentando il carico aumenta il volume di materiale plasticizzato e si creano nuove plasticizzazioni in altri punti del materiale. La temperatura superficiale risulta dipendente oltre che dallo sforzo sul materiale, anche dalle coordinate dei punti su di esso.

L'andamento della temperatura superficiale non è più lineare, perché diminuisce il volume di materiale con comportamento termoelastico (che si raffredda) ed aumenta il volume di materiale plasticizzato (che si riscalda).

Al termine della prova di trazione analizzando il grafico relativo alla temperatura superficiale del provino e correlandolo con il grafico relativo alla sforzo, è possibile individuare l'intorno della tensione media σ_0 per la quale è iniziata la fase di prima plasticizzazione (zona II). σ_0 è quel valore di sforzo medio che ha causato l'inizio di una microplasticizzazione la quale ha generato una quantità di calore che provocato una variazione nella curva "sforzo vs ΔT ".

All'aumentare del carico aumentano anche le microplasticizzazioni (zona III del diagramma), superato il limite di snervamento (zona IV del diagramma) la tensione media ha raggiunto valori per cui la deformazione plastica è tale che la maggior parte dei cristalli risulta deformata plasticamente, quindi l'effetto termoelastico è trascurabile e si ha riscaldamento di tutto il materiale con un aumento nella temperatura superficiale, fino ad arrivare a valori di ΔT positivi.

Se si fosse in grado di valutare il primo insorgere del calore dQ per effetto del carico medio esterno sul provino si individuerebbe la tensione di prima microplasticizzazione e, di conseguenza, quello che convenzionalmente è definito limite di fatica del materiale. Infatti, sollecitando il provino con carichi oscillanti e corrispondenti tensioni superiori a tale valore, dopo un certo tempo, si raggiungerebbe la rottura. Se invece il provino fosse sollecitato con valori inferiori a tale limite non si avrebbe alcuna rottura ed il materiale avrebbe durata infinita.

Capitolo 4. Analisi presenti in letteratura sul materiale composito trattato

Le analisi sperimentali riportate in questo capitolo sono state svolte dall'istituto di metallurgia del Clausthal University of Technology (TUC).

4.1. Analisi e confronto dei trattamenti superficiali

Alcuni campioni di poliolefina e di acciaio 316 sono stati sottoposti separatamente al trattamento corona e al trattamento plasma.

Per il trattamento corona si è operato con un voltaggio di 13 KV con una frequenza di risonanza variabile nell'intorno 20 KHz, potenza di 180 W.

Invece, per il trattamento plasma la potenza è di 500 W, con un voltaggio di 28 KV.

Sono state fatte varie prove sui fogli di poliolefina e di acciaio 316L.

Dopo il trattamento i campioni sono stati analizzati con un microscopio a scansione elettronica (SEM). Per questa analisi i campioni in materiale polimerico sono stati ricoperti da un sottile strato di oro. [22]

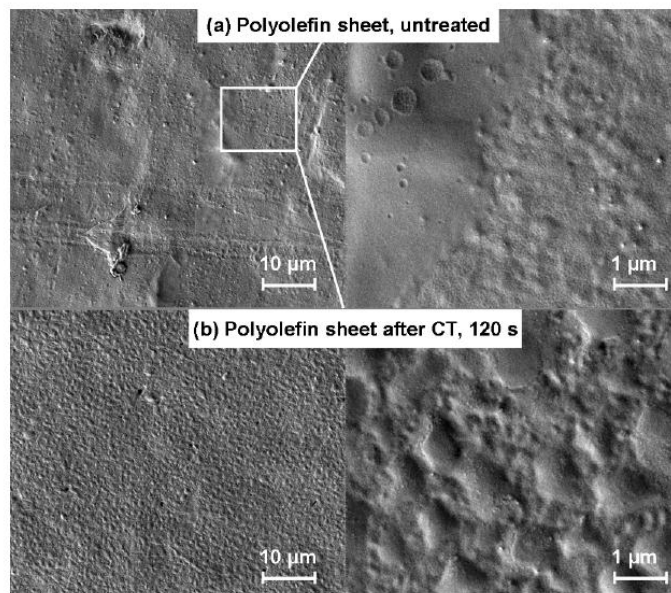


Figura 4.1 immagine SEM di compioni in PP-PE prima (a) e dopo (b) un trattamento corona di 120 s.

L'effetto del trattamento corona sulla morfologia e sulla bagnabilità delle superfici è stato verificato sperimentalmente. Le immagini al microscopio elettronico dei films di PP-PE mostrano che il trattamento corona provoca sulla superficie una porosità irregolare. Oltre a questi pori, le particelle ad alta energia, che bombardano la superficie durante il trattamento, formano altre cavità di più piccole dimensioni.

La porosità e l'irregolarità della superficie migliorano le proprietà di adesione della superficie.

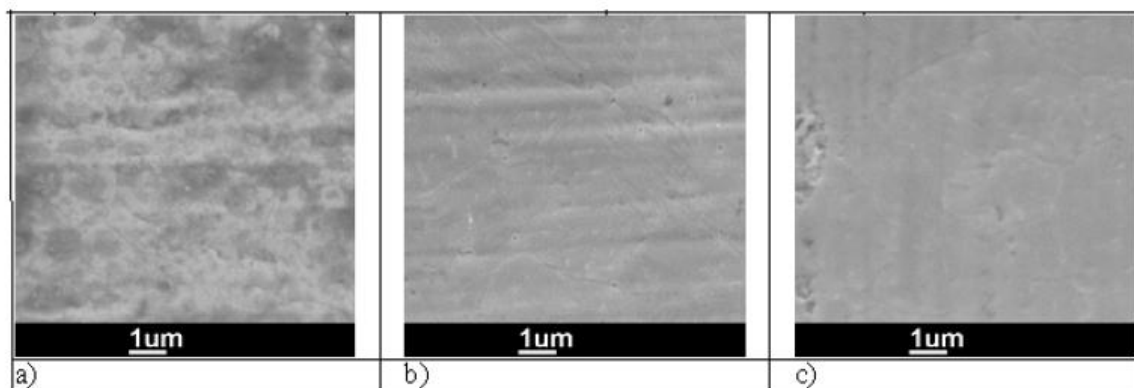


Figura 4.2 Immagine SEM di acciaio non trattato (a) comparato con trattamento corona (b) e plasma (c).

La figura compara l'effetto del trattamento corona e quello al plasma, entrambi eseguiti per il tempo di 20 secondi.

Si osserva che il trattamento al plasma è più intenso rispetto a quello corona.

Questa differenza è dovuta anche alla differente temperatura che si raggiunge nei due trattamenti: circa 25 °C in quello corona e circa 150 °C in quello al plasma.

Si consiglia quindi di utilizzare il trattamento al plasma per superfici metalliche e quello corona per le superfici polimeriche, in quanto le alte temperature provocano il degrado del materiale polimerico.

4.2. Test di adesione

Per verificare l'adesione tra i fogli di materiale polimerico e quelli in metallo, sono state eseguiti dei test di adesione sulla base della norma DIN 53281-2.

Le dimensioni dei campioni usati sono: 170 mm x 30 mm x 1,6 mm.

Sono stati testati 6 campioni per ogni casistica e sono stati mediati per costruire i grafici. [22]

Di seguito viene riportato il grafico di una prova di adesione, in cui si osserva che la forza per distaccare i due fogli è massima al momento in cui avviene la rottura iniziale, poi si stabilizza su di un valore più basso durante tutta la fase di distaccamento.

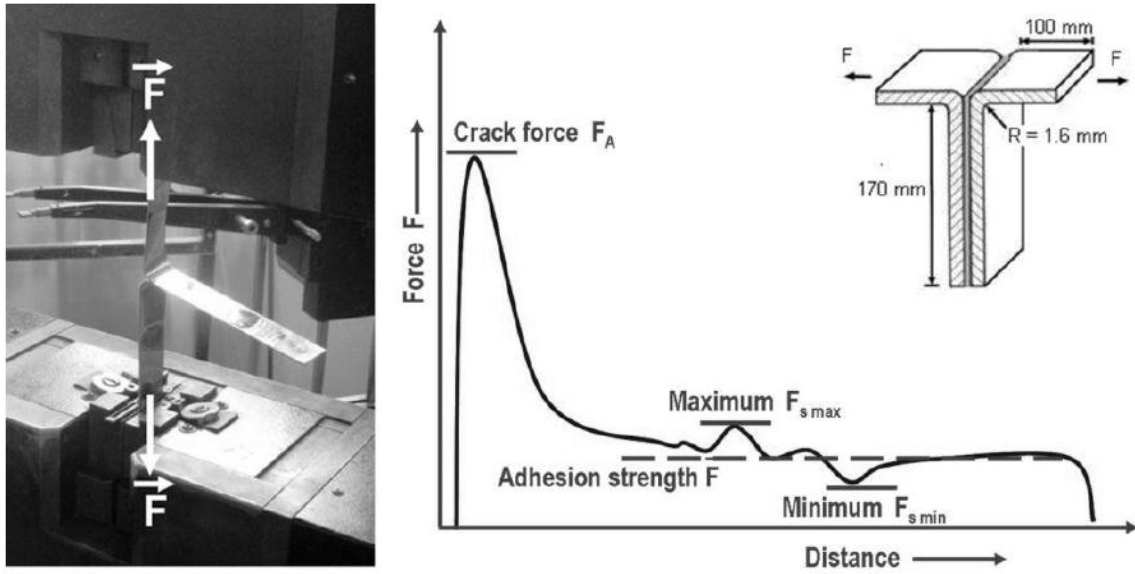


Figura 4.3 Grafico della prova di adesione

La forza iniziale di rottura è definita da:

$$P_A = \frac{F_A}{b} \text{ [N/mm]} \quad (4.1)$$

Mentre la forza media di adesione:

$$P_s = \frac{\bar{F}}{b} \text{ [N/mm]} \quad (4.2)$$

Dove b è la larghezza del campione (30 mm).

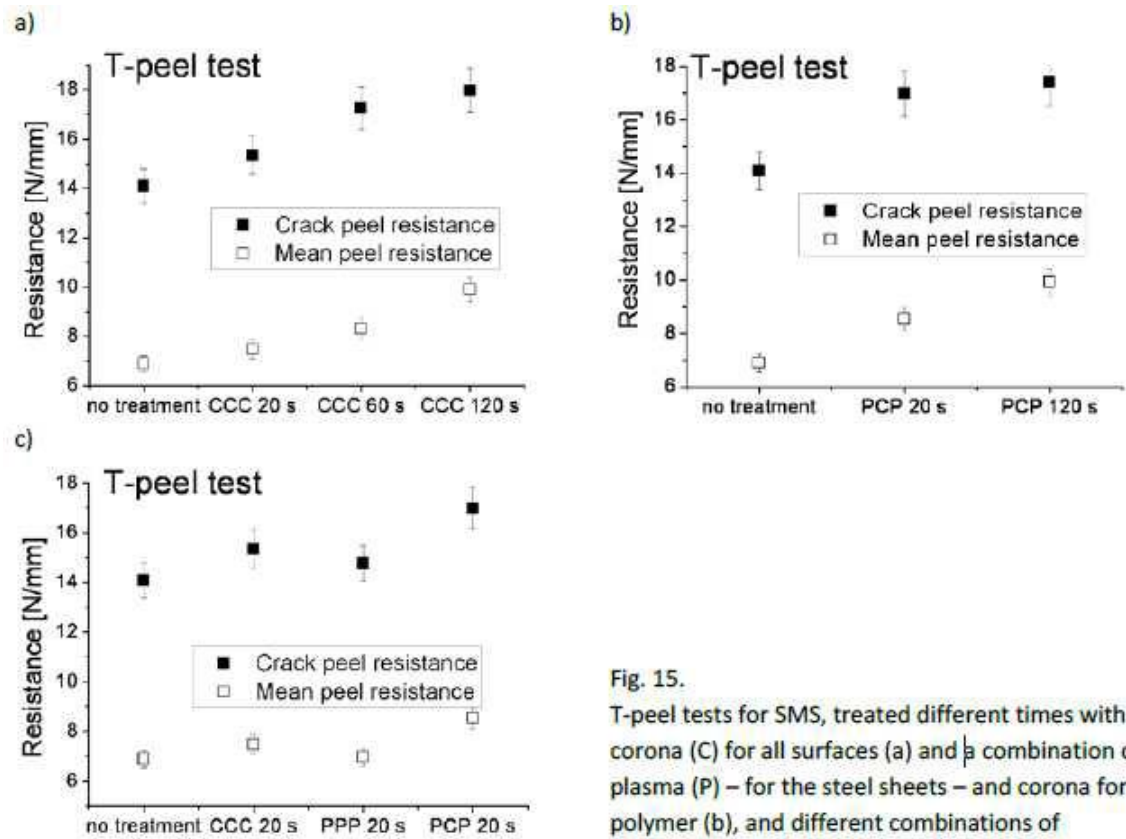


Fig. 15. T-peel tests for SMS, treated different times with corona (C) for all surfaces (a) and a combination of plasma (P) – for the steel sheets – and corona for the polymer (b), and different combinations of treatment and at constant time (c)

Figura 4.4 Risultati dei test di adesione sui campioni di materiale a sandwich

In figura 4.4 sono rappresentati i risultati ottenuti dai test sui campioni.

Dal grafico *a* si osserva che il trattamento corona sia sui fogli di metallo sia su quello in materiale polimerico, incrementa la forza di adesione e questa risulta maggiore, più a lungo avviene effettuato il trattamento.

Il grafico *b* mostra una comparativa tra il composito senza trattamento e quello con trattamento plasma per i fogli metallici e corona per i fogli polimerici. Questa si conferma un' ottima soluzione già a brevi tempi di esposizione.

Infine il grafico *c* conferma le ipotesi teoriche, secondo le quali il trattamento plasma per i materiali polimerici espone la superficie a temperature troppo elevate, mentre è più efficace sui fogli metallici.

4.2.1. Shear test

Sono stati eseguiti anche dei test di taglio su campioni preparati come in figura (4.5).

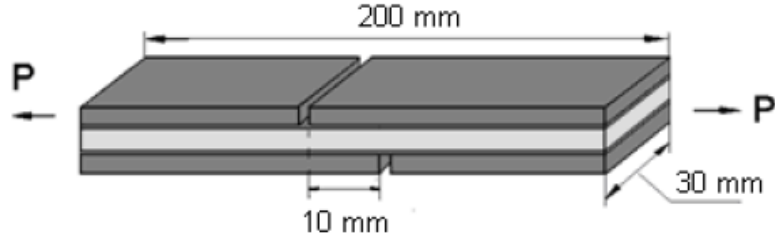


Figura 4.5 geometria del campione per i test di resistenza a taglio

La larghezza delle fenditure è di 2,5 mm e l'area soggetta allo sforzo di taglio è pari a 300 mm²

La resistenza al taglio è definita dalla seguente formula:

$$P = \frac{F_{max}}{A} \text{ [N/mm]} \quad (4.3)$$

Dove F_{max} è la forza massima rilevata durante il test di taglio e A è l'area soggetta allo sforzo di taglio (300 mm²)

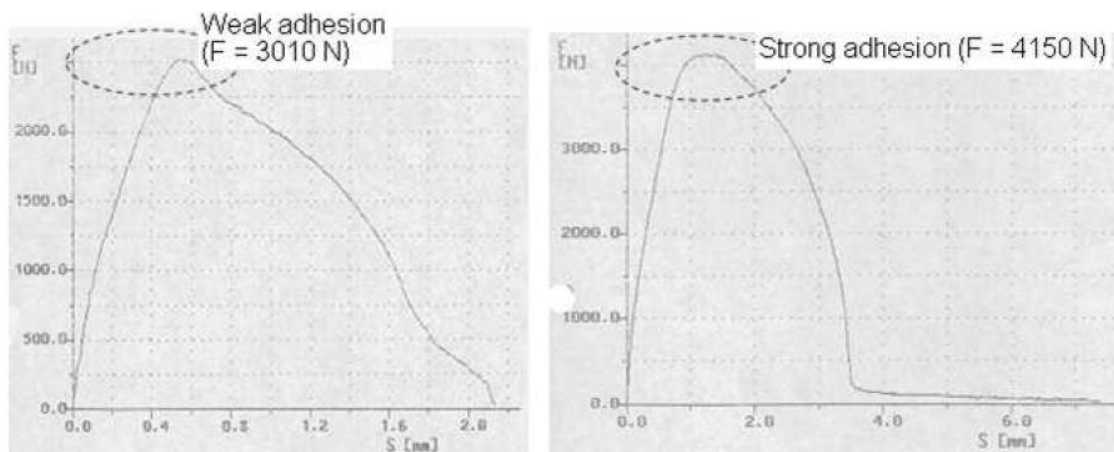


Figura 4.6 Risultati dei test di resistenza a taglio

In figura sono rappresentati due grafici relativi alla prova di taglio di due campioni diversi, il primo, senza trattamento superficiale con una forza di adesione debole (3010 N), il secondo, trattato con il metodo corona, con una forza di adesione più forte (4150 N).

Tuttavia si è visto che la forza di adesione dipende anche dalla durata del trattamento superficiale.

Questi risultati sono spiegati dalla formazione di gruppi funzionali polari indotti dal trattamento Corona.

In figura 4.7 sono riportati i risultati sperimentali ottenuti dai test di resistenza a taglio per il materiale composito a sandwich trattato a tempi diversi con il metodo corona e plasma.

Dal grafico a si osserva che trattando con il metodo Corona tutte le superfici, all'aumento del tempo di trattamento, aumenta la resistenza al taglio.

Il grafico b mostra che il trattamento plasma su tutte le superfici è meno efficace rispetto a quello corona, questo comportamento è dovuto al fatto che con il trattamento al plasma sul foglio polimerico, viene superata la temperatura di fusione che porta a un degrado nel materiale. La combinazione più efficace risulta essere il trattamento corona per il polimero e plasma per il metallo, e, come mostra il grafico c, la resistenza al taglio aumenta all'aumentare della durata del trattamento.

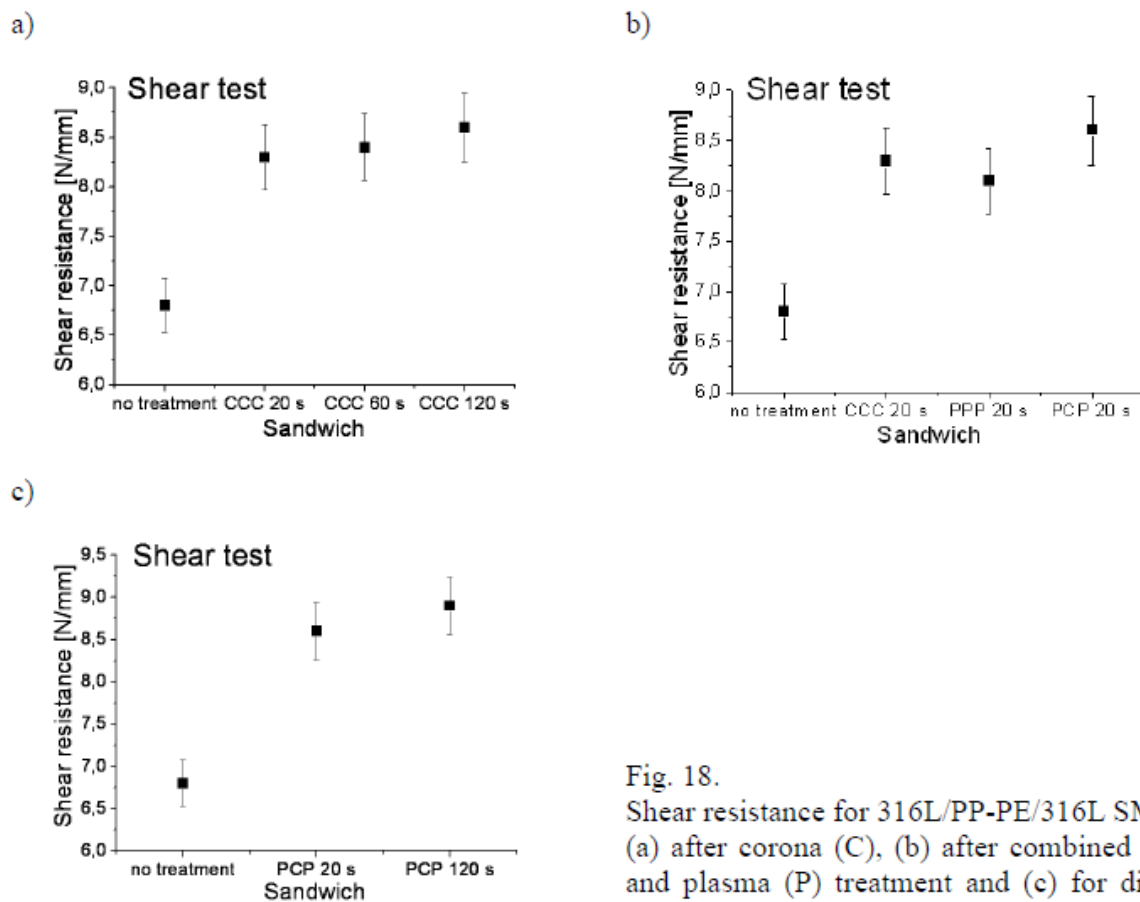


Fig. 18.
Shear resistance for 316L/PP-PE/316L SMS
(a) after corona (C), (b) after combined corona and plasma (P) treatment and (c) for different exposure times

Figura 4.7 Resistenza a taglio (a) dopo il trattamento corona (C), (b) dopo un trattamento combinato corona e plasma (P) e (c) per diversi tempi di esposizione al trattamento

In conclusione, il trattamento corona in combinazione con quello al plasma, possono essere utilizzati per migliorare la bagnabilità e le proprietà di adesione di un composito metallo – polimero: la resistenza a taglio passa da 7 N/mm a 8,5 N/mm.

4.3. Caratterizzazione meccanica

Sono state eseguite delle prove di trazione sui materiali che costituiscono il composito a sandwich con lo scopo di determinare lo sforzo di snervamento, lo sforzo massimo e l'allungamento a rottura.

Il foglio metallico di 316L, il foglio polimerico di PP-PE e il materiale sandwich sono stati ritagliati, ricavando provini rettangolari con una lunghezza di 120 mm.

I test sono stati effettuati alla velocità di $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. [15]

Per determinare l'anisotropia del materiale, le prove sono state effettuate ponendo la direzione in cui è avvenuta la laminazione a diversi angoli (0° , 45° , 90°) rispetto alla direzione di trazione.

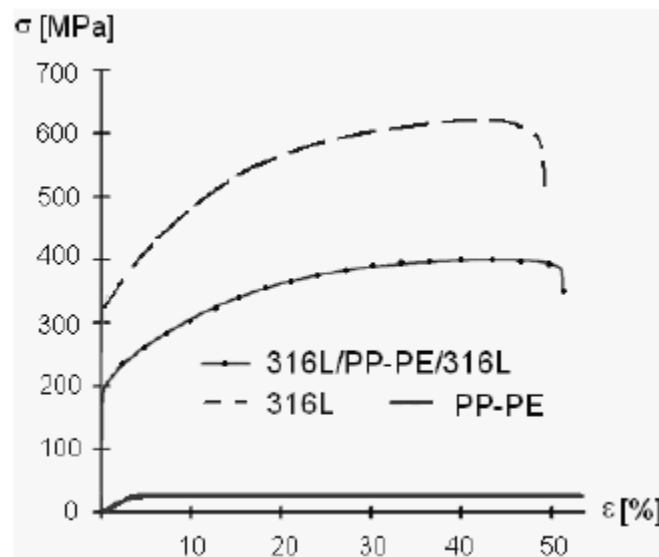


Figura 4.8 Curve sforzo-deformazione

Il grafico mostra la relazione tra sforzo e deformazione del provino durante una classica prova di trazione uniassiale. Le prove sono state eseguite a temperatura ambiente.

E' stato comparato il materiale composito con i materiali che lo costituiscono ponendo la direzione di trazione in modo trasversale rispetto a quella di laminazione.

Sia l'acciaio 316, che il materiale composito SMS mostrano un comportamento duttile con uno sforzo massimo sopportato rispettivamente di 620 MPa e 400 MPa e una deformazione massima a rottura del 50 % e del 53 %.

Il materiale composito, sopporta uno sforzo massimo che è compreso tra quello sopportato dal metallo e dal polimero che lo compongono. Tale sforzo massimo può essere calcolato con la seguente formula:

$$\sigma_{SMS} = \frac{\sigma_M \cdot V_M + \sigma_P \cdot V_P}{V_M + V_P} \quad (4.4)$$

Dove σ indica lo sforzo di trazione uni assiale e V la frazione di volume di metallo (M) e polimero (P).

Sono stati eseguite delle prove ponendo la direzione di rullatura a 3 diversi angoli rispetto alla direzione di trazione (0° , 45° , 90°). Il numero di prove per ogni casistica è pari a 5, al termine è stato calcolato il valor medio e la deviazione standard (SD).

Tabella 4.1 Proprietà meccaniche di 316L, PP-PE, SMS in funzione della direzione di rullatura rispetto a quella di trazione.

Sample	Angle to rolling direction α [°]	YS \pm SD [MPa]	TS \pm SD [MPa]	ER10 \pm SD [%]
316L	0°	310 ± 1	608 ± 4	48 ± 2
	45°	313 ± 7	610 ± 9	54 ± 1
	90°	314 ± 6	618 ± 14	53 ± 1
PP-PE	0°	26 ± 1	-	-
	45°	24 ± 1	-	-
	90°	28 ± 1	-	-
SMS 316L/PP-PE/316L	0°	180 ± 18	388 ± 19	48 ± 3
	45°	180 ± 2	378 ± 4	49 ± 2
	90°	196 ± 16	400 ± 18	53 ± 3

Sono state eseguite altre prove a trazione per valutare l'effetto della direzione di laminazione dei due fogli metallici che costituiscono il composito.

Sono stati prodotti due prototipi: il primo denominato "L" in cui entrambi i fogli metallici sono stati assemblati con la medesima direzione di laminazione, il secondo denominato "T" prodotto assemblando il secondo foglio metallico con la direzione di laminazione perpendicolare rispetto al primo.

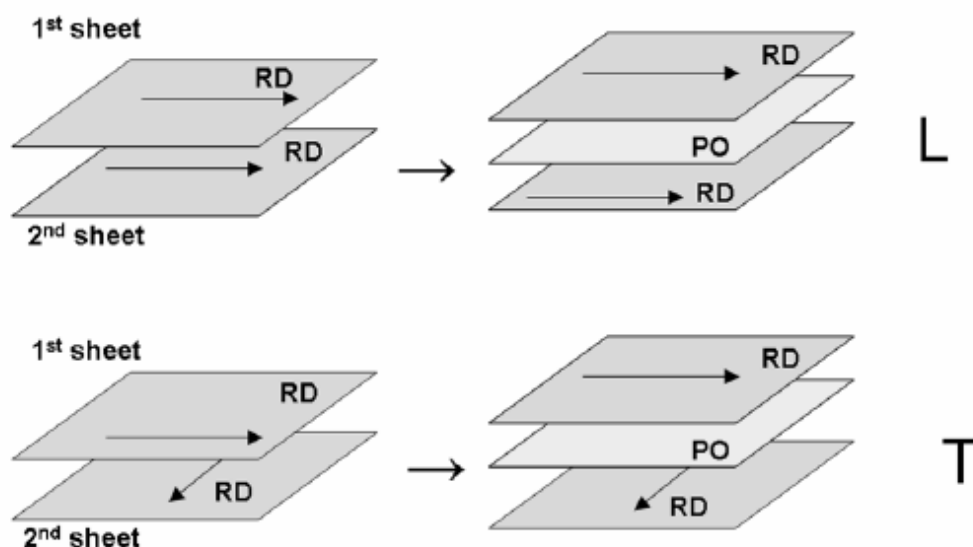


Figura 4.9 Il materiale composito a sandwich viene denominato “L” o “T” in funzione della direzione di rullatura sui fogli metallici.

I compositi “L” e “T” sono stati prodotti in parte utilizzando il foglio in materiale polimerico trattato superficialmente con il metodo corona, e in parte utilizzando un foglio non trattato.

Sono state eseguite 3 prove di trazione uniassiale per ogni combinazione in cui è stato prodotto il composito, i risultati sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 4.2 Proprietà meccaniche del materiale SMS in funzione della direzione di rullatura e della presenza o meno del trattamento corona (CT) sul foglio di poliolefina.

SMS	Angle to rolling direction α [°]	YS \pm SD [MPa]	TS \pm SD [MPa]	ER10 \pm SD [%]
L	0	180 \pm 18	388 \pm 19	48 \pm 3
	90	196 \pm 16	400 \pm 18	53 \pm 3
L_CT	0	192 \pm 20	402 \pm 20	43 \pm 2
	90	208 \pm 18	414 \pm 20	48 \pm 2
T	0	174 \pm 17	381 \pm 21	48 \pm 6
	90	190 \pm 21	398 \pm 19	53 \pm 5
T_CT	0	203 \pm 20	409 \pm 22	48 \pm 3
	90	189 \pm 20	394 \pm 20	43 \pm 5

I risultati ottenuti evidenziano come questo tipo di compositi sia molto sensibile alle proprietà superficiali degli strati che lo compongono.

Utilizzando il trattamento corona (CT) si ottiene un miglioramento dei valori di sforzo a snervamento e di sforzo massimo sopportato, mentre si osserva una riduzione nell'allungamento massimo a rottura.

Capitolo 5. Metodo di sperimentazione

La parte sperimentale di questo lavoro consiste nell'analisi termografica del materiale composito sandwich (316L-poliiolefina-316L) durante lo svolgimento di prove a trazione.

In particolare si è voluto studiare l'andamento della temperatura superficiale nei primi istanti della prova, durante i quali si ha il passaggio dalla fase completamente elastica a quella plastica.

Ci sono state fornite delle lastre di materiale da analizzare da Prof. Dr. -Ing. Heinz Palkowski dell'istituto di metallurgia del "TU Clausthal" (Clausthal University of Technology).

Durante la prima fase del lavoro, tramite tranciatura, si sono ritagliati tre provini rettangolari sottoposti successivamente alla prova di trazione fino alla rottura. I primi 2 provini sono stati sottoposti a una prova di trazione con una velocità di 5 mm/min nella direzione longitudinale a quella di rullatura del materiale ibrido, il terzo provino con una velocità di 10 mm/min nella direzione trasversale a quella di rullatura. Tutte le prove sono state riprese con la termocamera al fine di monitorare costantemente la temperatura superficiale.

Riportando i dati ottenuti dalla cella di carico della macchina di trazione e dalla termocamera in un foglio elettronico sono state ricavate le proprietà del materiale, quali: modulo di Young, sforzo e deformazione allo snervamento, sforzo massimo, deformazione a rottura. Durante la seconda fase del lavoro si è deciso di danneggiare in modo controllato le lastre di materiale e ripetere le prove di trazione analizzando la variazione di temperatura (a questo punto non più omogenea sulla superficie).

Per danneggiare le lastre in modo controllato si è scelto di impattare le lastre con un proiettile in acciaio. Il proiettile è stato fatto cadere da diverse distanze in vari punti della lastra, misurata la velocità al momento dell'impatto si è calcolata l'energia scambiata durante l'urto.

Successivamente, mediante tranciatura sono stati ricavati i provini da testare, ognuno con al centro una zona deformata dall'impatto. Come per il materiale privo di difetti macroscopici, è stata eseguita una prova di trazione per ogni provino monitorando la temperatura superficiale dello stesso con la termocamera.

La fase finale del lavoro è stata l'analisi e il confronto dei dati di temperatura ottenuti: sono stati analizzati i video registrati dalla termo camera, utilizzando il software Altair per ogni provino sono state selezionate alcune aree superficiali di interesse ed è stata estrapolata in Excel la temperatura media ad ogni istante della prova, creando dei grafici si è illustrato l'andamento della variazione di temperatura nelle varie zone della superficie in funzione del tempo e analizzando tali curve si è cercato di stabilire l'entità del danno per ogni zona.

5.1. Danneggiamento controllato delle lastre

5.1.1. Descrizione del metodo utilizzato

Per ottenere un danneggiamento controllato del materiale in prova, le lastre sono state impattate lasciando cadere per gravità un proiettile da altezze differenti.

E' stata utilizzata un'apparecchiatura che consentisse di misurare in modo accurato l'energia con cui il proiettile va ad impattare sulla lastra stessa.

Come proiettile è stato usato un cilindro di acciaio con saldata all'estremità una sfera del diametro di un pollice (25,4 mm). Per motivi di sicurezza e per controllarne la traiettoria, il proiettile cade all'interno di un cilindro cavo in acciaio di diametro interno leggermente superiore a quello del proiettile. Il cilindro guida è dotato di una fenditura

che corre per tutta la sua lunghezza, in modo da permettere la misurazione della velocità del proiettile.

Tale misura avviene tramite l'utilizzo di un laser collegato ad un software. Il laser misura la distanza tra la sorgente e il punto in cui il raggio viene riflesso.

Nel caso specifico, il laser viene fatto passare attraverso la fenditura del cilindro guida in modo da attraversare trasversalmente la traiettoria del proiettile.

Il proiettile, prima di essere rilasciato, viene trattenuto ad una altezza definita per mezzo di un magnete a sua volta fissato ad un cavo che lo mantiene in sospensione all'altezza voluta.

La lastra di composito è fissata sotto il cilindro guida per mezzo di 4 piastre di acciaio che la fissano alle estremità di una zona di 60 X 60 mm, il cui centro viene attraversato dalla traiettoria del proiettile.

5.1.2. Esecuzione delle prove

Come prima cosa viene posizionata la lastra del materiale da impattare sul supporto al di sotto del cilindro guida.

Viene quindi attaccato il proiettile al magnete e tenuto in sospensione all'interno del cilindro guida all'altezza prefissata.

Viene posizionato il laser, avendo cura di mantenerlo il più vicino possibile alla lastra, in modo da avere una stima più precisa della velocità al momento dell'impatto.

Dopo aver fatto partire il software di registrazione della distanza misurata dal laser, viene disattivato il magnete, e il proiettile cade per gravità sulla lastra.

Per impedire che la lastra venga danneggiata più volte nello stesso punto, a causa della risposta elastica che fa rimbalzare il proiettile, dopo il primo impatto viene interposto manualmente un pannello di materiale espanso che protegge il provino da ulteriori impatti.

L'energia trasmessa alla lastra durante l'urto, viene stimata tramite la seguente formula:

$$U(h) = mgh \quad (5.1)$$

Dove U è l'energia potenziale di un corpo di massa m posto ad un'altezza h rispetto ad un riferimento e g ($9,81 \text{ m/s}^2$) è l'accelerazione di gravità terrestre.

Nel caso specifico delle nostre prove,

h : distanza tra l'estremo inferiore del proiettile e la lastra

m : massa del proiettile

L'energia calcolata in questo modo è una sovrastima dell'energia che possiede il proiettile all'istante dell'impatto. Parte dell'energia viene persa durante la caduta, in parte per l'attrito dell'aria, in parte per l'attrito sulla superficie interna del cilindro guida.

Viene quindi calcolata l'energia cinetica posseduta dal proiettile al momento dell'attraversamento del laser:

$$T_1 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.2)$$

V è la velocità del proiettile calcolata dalla misura del laser: si divide la lunghezza del proiettile per il tempo che impiega ad attraversare il raggio. In questo modo si ottiene la velocità media del proiettile tra h_1 e h_1-L . il moto è rettilineo uniformemente accelerato, quindi la velocità così calcolata corrisponde alla velocità istantanea del proiettile all'altezza $h_p = h_1 - \frac{L}{2}$

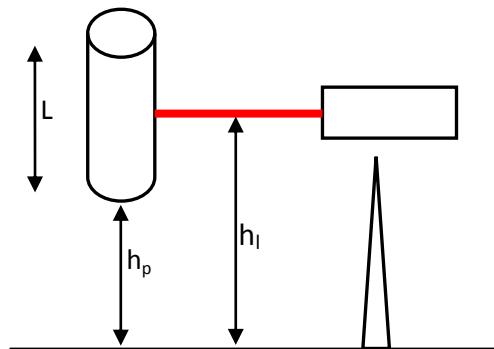


Figura 5.1 Misura della velocità di caduta del proiettile

All'energia cinetica così calcolata viene sommata l'energia potenziale corrispondente all'altezza h_1

$$E_{\text{imp}} = T_1 + U(h_1)$$

E_{imp} è una stima piuttosto accurata dell'energia con cui il proiettile ha impattato sulla lastra.

Al termine delle prove si ottiene una lastra di sms impattata in più punti.

La lastra viene tagliata in modo da creare un rettangolo di 50 mm x 150 mm con al centro la zona danneggiata dal proiettile.

I provini, dopo essere stati sgrassati e puliti con acetone, vengono verniciati con uno smalto acrilico di colore nero opaco.

5.2. Metodologia di svolgimento della prova di trazione

In letteratura non sono state trovate normative che regolino le condizioni di prova per la determinazione delle caratteristiche a trazione di questo tipo di materiale. Non sono presenti neanche relazioni su studi effettuati da altri ricercatori.

Si è deciso di fare riferimento alle norme UNI EN ISO 527-1 e UNI EN ISO 527-3 solitamente utilizzate per la caratterizzazione a trazione di film e lastre in materiale polimerico.

Per le prove a trazione sul materiale sandwich integro (non impattato dal proiettile), sono stati utilizzate provette a clessidra in riferimento alle norme sopra citate, per tutte le altre prove sono state utilizzate provette di forma rettangolare con il lato parallelo alla direzione di trazione della lunghezza di 150 mm e quello più corto di 50 mm (larghezza massima consentita dai morsetti per afferrare la provetta). Si è scelta questa dimensione in modo da poter contenere interamente l'area danneggiata dall'urto all'interno delle provette.

Le provette sono state ottenute per tranciatura per le prove sul materiale integro e tramite l'utilizzo di un seghetto per le prove sul materiale soggetto a danneggiamento. Non è stata utilizzata la tranciatura per le provette contenenti l'area volutamente danneggiata, perché data la disposizione delle zone impattate sulla lastra, la macchina per la tranciatura ne avrebbe modificato la conformazione andando ad inficiare i risultati delle prove seguenti.

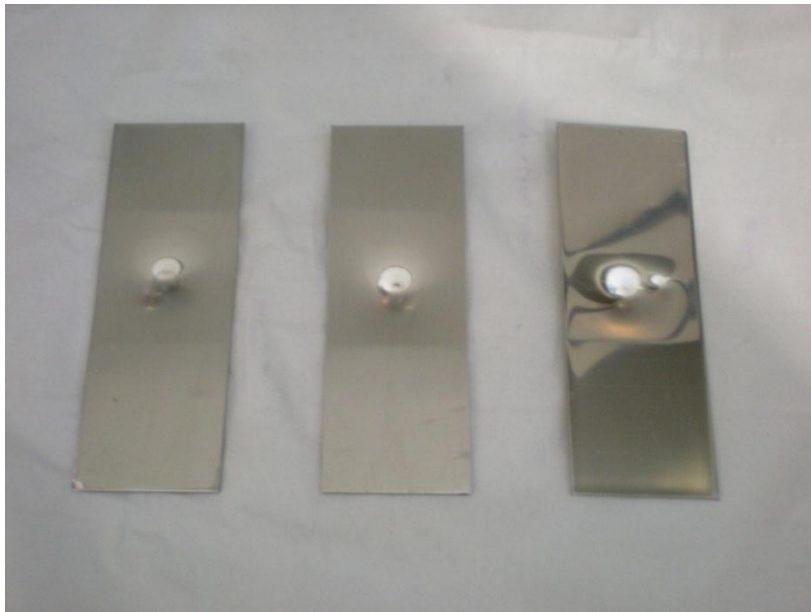


Figura 5.2 Provette con al centro la zona danneggiata

Le bave e le imperfezioni dei contorni delle provette sono state eliminate con l'utilizzo di una carta vetrata a grana fine. Sono state quindi sgrassate e pulite con acetone e successivamente verniciate con un sottile strato di smalto acrilico spray di colore nero opaco per evitare che la termografia venga falsata dalla riflessione della superficie in metallo lucido.



Figura 5.3 Provette al termine della verniciatura

E' stata misurata la larghezza con un calibro di accuratezza 0,1 mm e lo spessore con un micrometro di accuratezza 0,02 mm al centro di ogni provetta ed a 5 mm dall'estremità della lunghezza di misurazione (100 mm). Sono stati calcolati i valori medi per la larghezza e lo spessore di ciascuna provetta, tali valori sono stati inseriti nel software connesso alla macchina di trazione per calcolare lo sforzo medio nel campione a partire dal valore di forza rilevato dalla cella di carico.

La macchina utilizzata è una Instron 4505 con una cella di carico di 100 KN (fig 5.4).

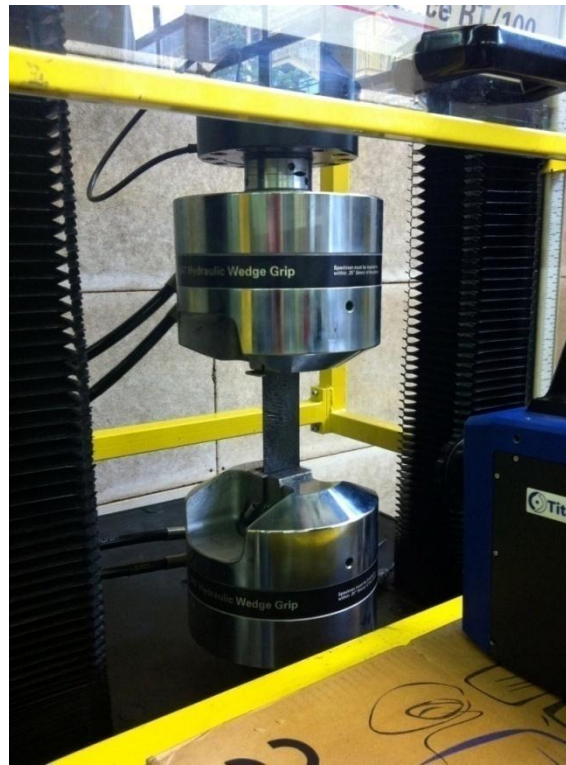


Figura 5.4 Svolgimento della prova di trazione

I morsetti per serrare la provetta sono stati vincolati alla macchina di trazione in modo che l'asse principale della provetta coincida con la direzione della forza passante per il loro centro di serraggio. Lo scivolamento della provetta è impedito dalla zigrinatura presente sulla superficie dei morsetti e dalla pressione di serraggio degli stessi. La provetta è stata fissata ai morsetti in modo da lasciare una distanza di 100 mm tra il morsetto superiore e quello inferiore.

Con il controllo micrometrico dello spostamento del morsetto superiore si è portato il valore di forza rilevato dalla cella di carico, prima dell'inizio del test, il più possibile vicino allo zero, mantenendo sempre valori positivi (di trazione).

Le prove sono state svolte a temperatura ambiente in condizioni di umidità standard.

5.2.1. Determinazione delle caratteristiche a trazione

Resistenza a trazione, R_m : Carico unitario massimo a trazione sopportato dalla provetta durante una prova di trazione. È espresso in megapascal (MPa).

Tensione allo snervamento, R_{sn} : valore di tensione associato a una deformazione plastica irreversibile dello 0,2%. E' espresso in megapascal (MPa)

Deformazione a trazione, ϵ : Incremento in lunghezza per unità della lunghezza iniziale del tratto di misura. Essa è espressa come un rapporto adimensionale oppure in percentuale.

Deformazione nominale alla rottura in trazione, ϵ_r : Deformazione nominale a trazione al carico unitario di trazione a rottura. Essa è espressa come un rapporto adimensionale oppure in percentuale.

5.3. Analisi termografica

Come illustrato nei capitoli precedenti, la termo camera è in grado di rilevare la radiazione nello spettro dell'infrarosso e quindi la radiazione termica. Basandosi sulle differenze di temperatura che è in grado di misurare, la telecamera termografica crea un'immagine dell'area che riprende; tramite questa immagine, attraverso complessi algoritmi, permette di ottenere la temperatura esatta in tutti i punti della superficie analizzata.

L'apparecchiatura usata in questo lavoro consiste in una camera termografica agli infrarossi FLIR Titanium SC7000. Di seguito sono riportate le principali caratteristiche tecniche:

La termocamera è stata utilizzata per rilevare la temperatura superficiale dei campioni durante tutte le prove di trazione. E' stata posizionata di fronte al campione con una

leggera inclinazione e ad una distanza di circa 250 mm ed è connessa ad un computer in cui è installato il software ALTAIR. Questo programma permette di configurare e controllare la telecamera, di acquisire e salvare tutti i dati del test e di elaborarli una volta concluso il test.

-sensore (InSb) del tipo Focal Plane Array (FPA) 320×256 pixel

-banda di frequenze: 2,5-5 μm o 8-12 μm

-risoluzione in pixel: 320×240 o 640×512 a 30, 25, 20 o 15 μm

-quantità di fotogrammi: fino a 380 Hz

-NETD: <18mK

5.4. Risultati delle prove a trazione sulle provette integre

Sono state fatte tre prove: due provette sono state ricavate in modo che la tensione durante il test sia longitudinale (HL) alla direzione in cui è avvenuta la rullatura del materiale e una in modo che tale direzione sia invece trasversale (HT) a quella di rullatura. Nelle prime due prove si è mantenuta una velocità di trazione pari a 5 mm/min, mentre la terza è stata eseguita a 10 mm/min.

Tabella 5.1 *Provette testate e condizioni di prova*

Provetta	HL1	HL2	HT1
Velocità (mm/min)	5	5	10
$\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,001667	0,001667	0,003333

Di seguito è riportato il grafico che mostra l'andamento dello sforzo e del ΔT medio sulla superficie in funzione del tempo.

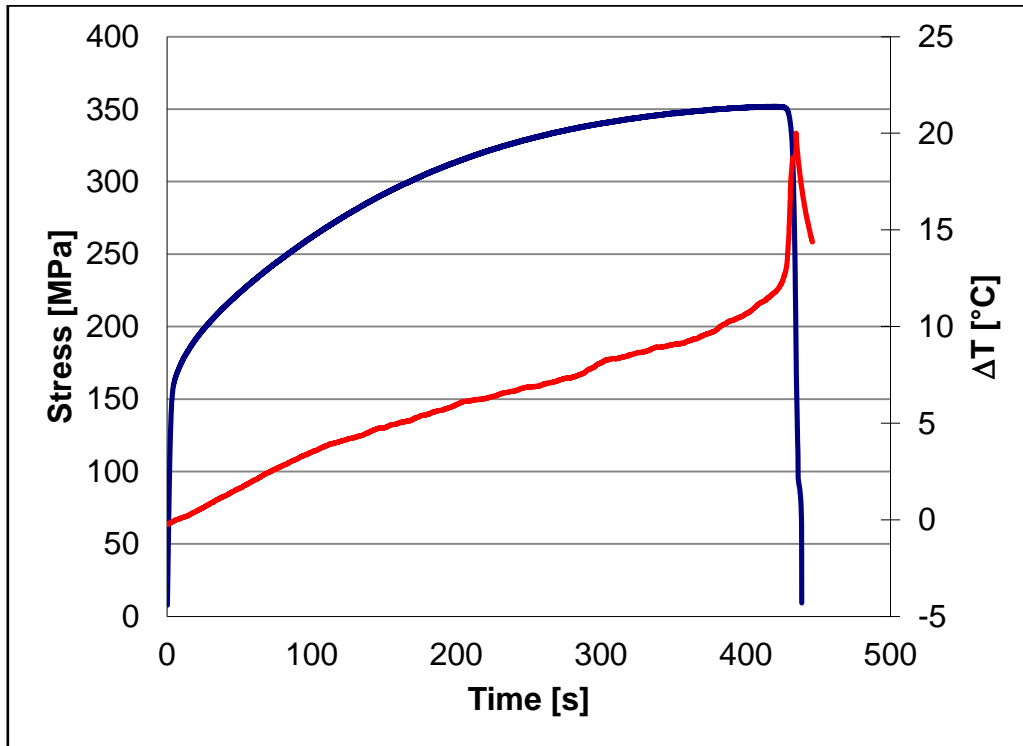


Figura 5.5 Sforzo e temperatura superficiale in funzione del tempo relativo alla provetta HLI



Figura 5.6 Provette al termine della prova di trazione

Si osserva una curva dello sforzo in funzione del tempo tipica di un materiale duttile, e una curva di temperatura crescente con un picco nell'istante della rottura.

La prima rottura che si verifica in questa tipologia di materiale composito avviene in uno dei due fogli metallici ad una deformazione mediamente pari al 45%, pochi istanti dopo avviene la rottura anche nel secondo foglio metallico. Tale livello di deformazione è molto al di sotto della deformazione a rottura del foglio in poliolefina, di conseguenza il composito rimane unito fisicamente dal foglio polimerico. In alcune applicazioni industriali questo aspetto potrebbe rivelarsi positivo ai fini della sicurezza.

Tabella 5.2 risultati relativi ai 3 provini testati

provetta	HL1	HL2	HT1	Media
Rm (MPa)	351,97	349,62	363,50	355,03
ϵ_r (mm/mm)	0,448	0,434	0,477	0,452672
Rsn (MPa)	148,63	147,47	167,94	154,68
vel di prova (mm/mim)	5	5	10	
$\dot{\epsilon}$ (1/s)	0,001667	0,001667	0,003333	

Come riscontrato in precedenti test su questa tipologia di materiale, si osservano proprietà meccaniche più elevate eseguendo la prova di trazione in direzione perpendicolare a quella in cui è avvenuta la rullatura.

La deformazione massima a rottura coincide con quella dell'acciaio 316, mentre lo sforzo massimo a rottura risulta essere compreso tra lo sforzo a rottura dell'acciaio e lo sforzo del polimero alla deformazione in cui è avvenuta la rottura del composito .

5.4.1. Analisi della linearità nel grafico sforzo-deformazione

Di seguito è stata studiata la linearità dello sforzo in funzione del tempo e quindi deformazione nei primi istanti delle prove. Per l'esecuzione di questa analisi non si è fatto riferimento ad alcuna normativa, ma si è voluto operare in modo analogo a quanto fatto per lo studio della temperatura, in modo da poter verificare l'esistenza o meno di una correlazione dei risultati.

La linearità è stata studiata creando una regressione lineare con Microsoft Excel: è stata fatta una regressione lineare della curva dello sforzo in funzione del tempo a partire dal valore al tempo zero (inizio prova) fino al valore per cui si ottiene il massimo valore del coefficiente di determinazione r^2 il quale è un indicatore del livello di precisione con cui l'equazione ottenuta dall'analisi di regressione spiega la relazione tra le variabili.

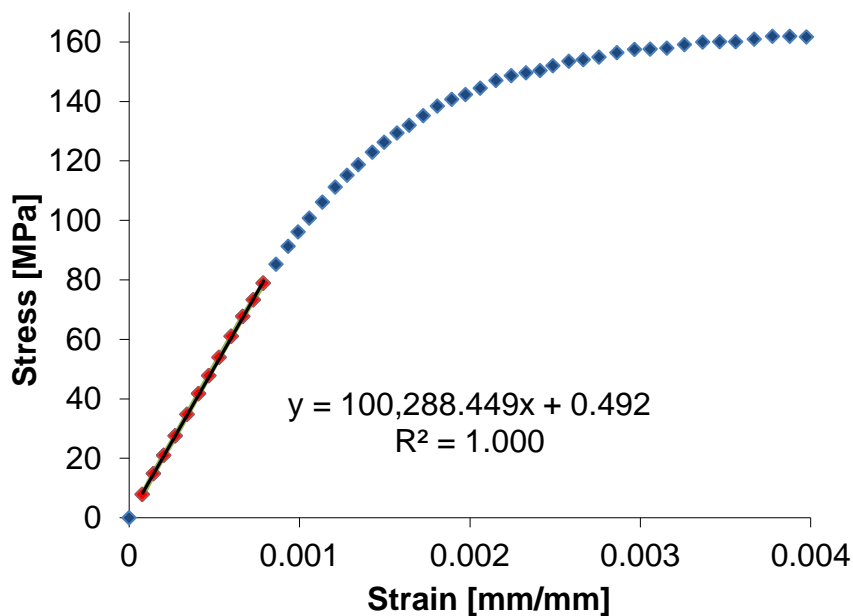


Figura 5.7 Curva sforzo deformazione nei primi istanti di prova della provetta HL1

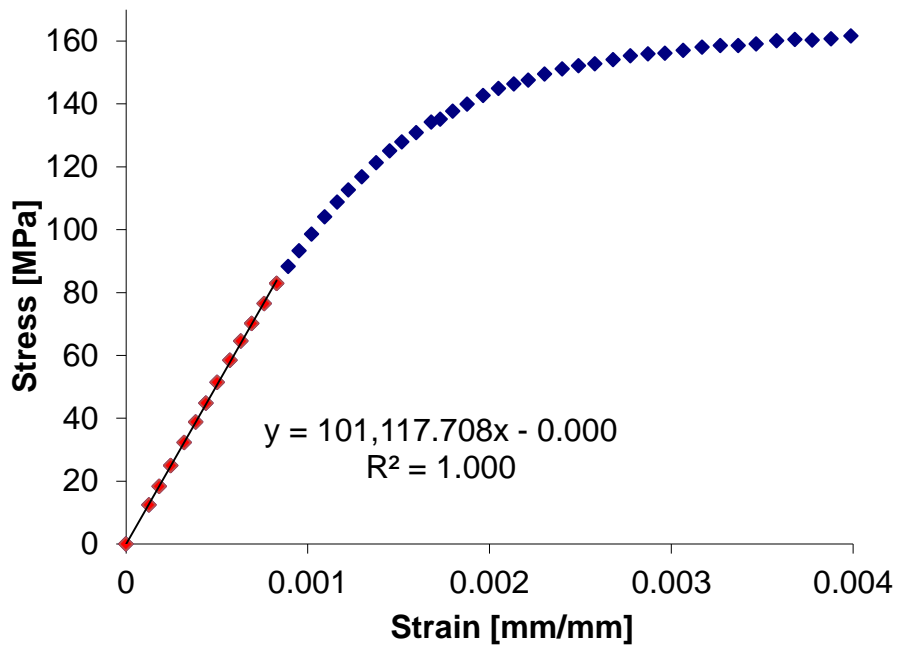


Figura 5.7 Curva sforzo deformazione nei primi istanti di prova della provetta HL2

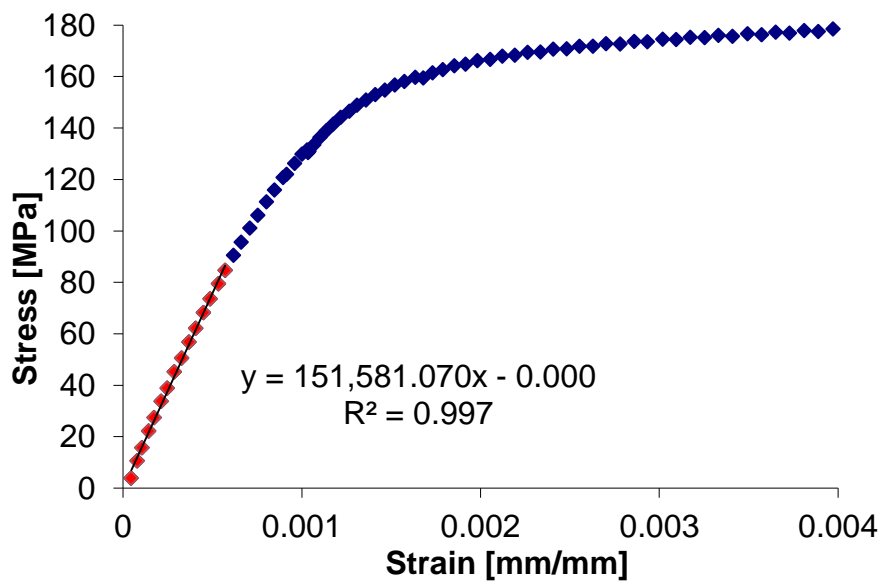


Figura 5.8 Curva sforzo deformazione nei primi istanti di prova della provetta HT1

Nella tabella seguente vengono riportati i valori di sforzo ai quali avviene la perdita di linearità nel grafico sforzo deformazione.

Tabella 5.3 Valori di sforzo per cui avviene la perdita di linearità sforzo-deformazione

Provetta	HL1	HL2	HT1	Media
σ_s (MPa)	79	83	85	82,3

Osservando i grafici sopra riportati, si nota come il modulo elastico nei primi istanti sia molto simile e mediamente pari a 100998 MPa nel caso delle prime due provette in cui la direzione di rullatura è posta a 0° rispetto a quella di trazione, mentre superiore del 50%, pari a 151581 MPa nella terza provetta in cui la direzione di rullatura è stata posta a 90° rispetto a quella di trazione ed è stata raddoppiata la velocità di trazione (da 5 mm/min a 10 mm/min).

Si ipotizza che questa differenza sia dovuta principalmente alla diversa direzione degli sforzi residui dalla deformazione meccanica del processo di rullatura, e in minima parte anche al materiale polimerico, le cui proprietà sono tempo dipendenti.

5.4.2. Analisi della temperatura superficiale

Riportando in un grafico i dati relativi solo ai primi secondi di esecuzione del test, si osserva che la temperatura superficiale subisce un calo prima di cominciare ad aumentare.

Tale calo avviene in modo lineare come previsto dalla teoria della termoelasticità, fino a che in qualche punto del materiale iniziano deformazioni plastiche permanenti che sviluppano calore modificando l'andamento lineare.

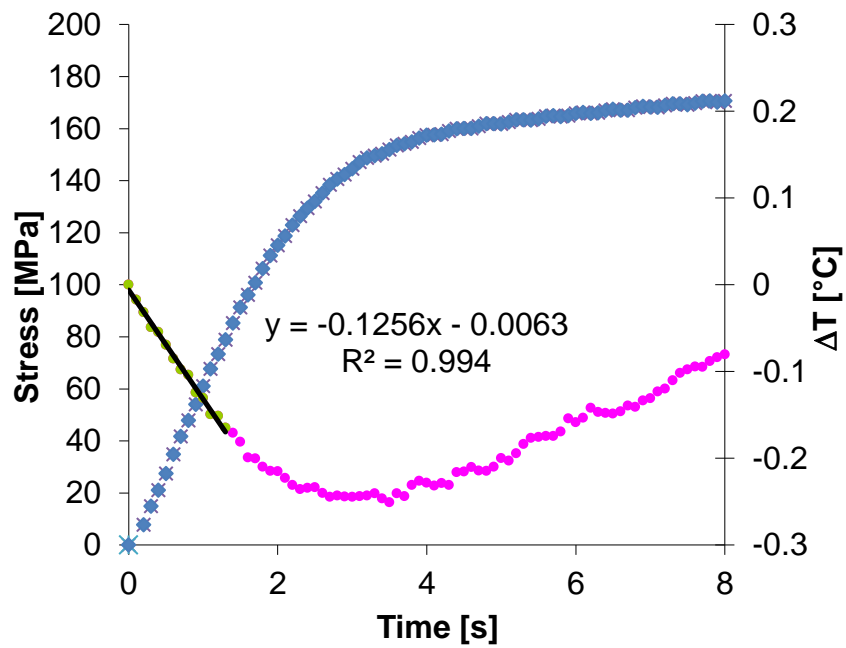


Figura 5.9 Sforzo e temperatura superficiale in funzione del tempo per la provetta HL1

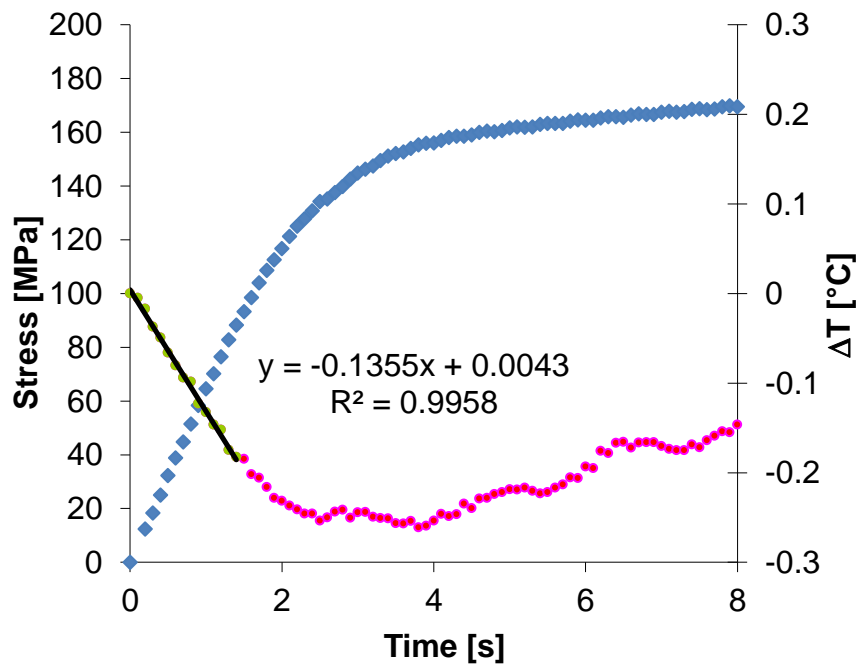


Figura 5.10 Sforzo e temperatura superficiale in funzione del tempo per la provetta HL2

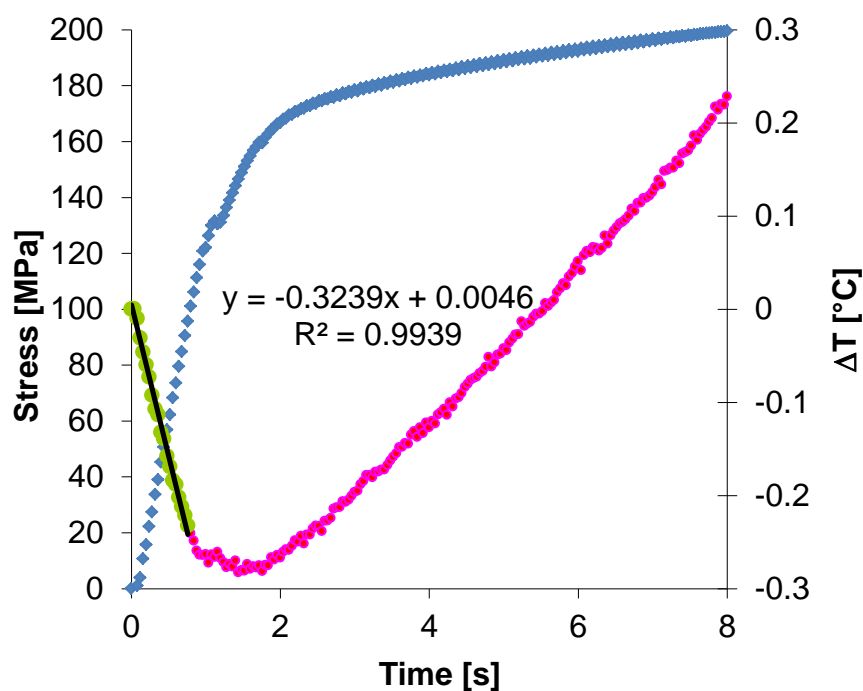


Figura 5.11 Sforzo e temperatura superficiale in funzione del tempo per la provetta HT1

Nella tabella 5.4 sono riportati per ogni provetta i valori di sforzo ai quali si ha il primo scostamento dalla linearità nella curva relativa alla temperatura (in verde) confrontati con i valori di sforzo ai quali si ha la perdita di linearità nella curva sforzo-deformazione (in rosso).

Tabella 5.4

Provetta	HL1	HL2	HT1	Media
σ_T (MPa)	85	88	96	93,3
σ_s (MPa)	79	83	85	82,3

Appare evidente la correlazione tra la linearità della curva relativa allo sforzo e quella della curva relativa al tempo. Dai dati ottenuti da queste prove sembrerebbe che i dati di temperatura siano leggermente in “ritardo” rispetto a quelli di sforzo, e questo si amplifichi al crescere della velocità di trazione. Infatti la differenza tra lo sforzo al quale si ha perdita di linearità nella curva dello sforzo-deformazione e lo sforzo al quale si ha perdita di linearità nella curva temperatura-deformazione è rispettivamente di 6 MPa e 5 MPa per le prove effettuate a 5 mm/min, mentre di 11 MPa per la prova effettuata a 10 mm/min.

5.4.3. Calcolo del minimo nel grafico relativo alla temperatura

L'andamento della temperatura nei grafici ottenuti, raggiunge un valore minimo a determinati valori di sforzo e deformazione.

Tabella 5.4 Minimo ΔT e valori di sforzo e deformazione corrispondenti

Provetta	HL1	HL2	HT1	Media
Min ΔT (K)	-0,246	-0,253	-0,278	-0,259
σ_{\min} (MPa)	147	151	151	149,7
ε (mm/mm)	0,00194	0,00215	0,00141	0,00183

Dai dati sopra riportati si osserva che lo sforzo al quale si ottiene il minimo di temperatura è abbastanza costante con una media pari a 149,6 , di conseguenza a causa della diversa pendenza delle curve sforzo-deformazione, quest'ultima varia in modo significativo tra le due diverse direzioni di rullatura rispetto alle quali sono state eseguite le prove di trazione.

5.4.4. Calcolo della costante termoelastica

Di seguito vengono riportati i grafici relativi alle prove di trazione sulle provette HL1, HL2 e HT1, in cui viene analizzato l'andamento della temperatura superficiale in funzione dello sforzo medio di trazione. Anche in questo tipo di grafico si osserva la linearità del primo tratto della curva, confermata dall'elevato valore del coefficiente di correlazione (R^2).

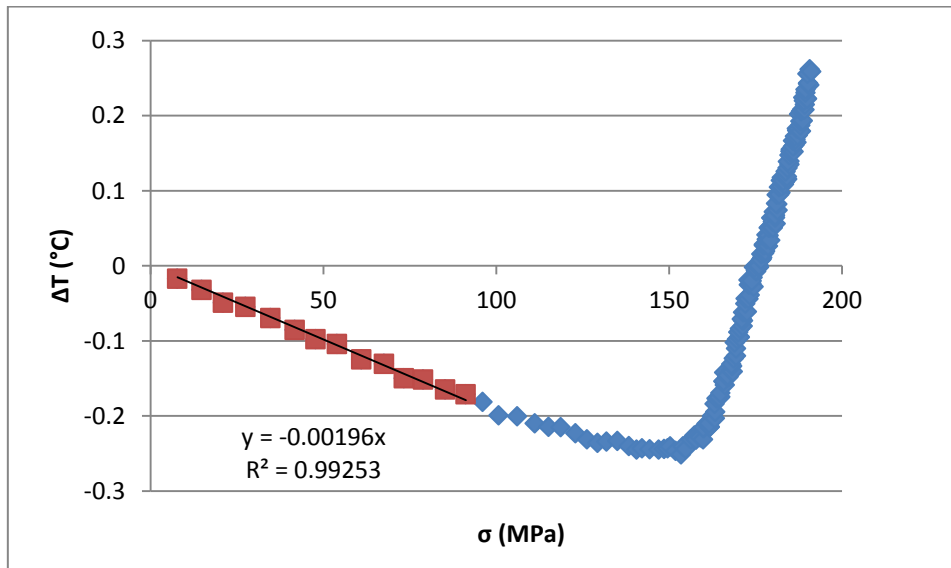


Figura 5.13 ΔT in funzione dello sforzo per la provetta HL1

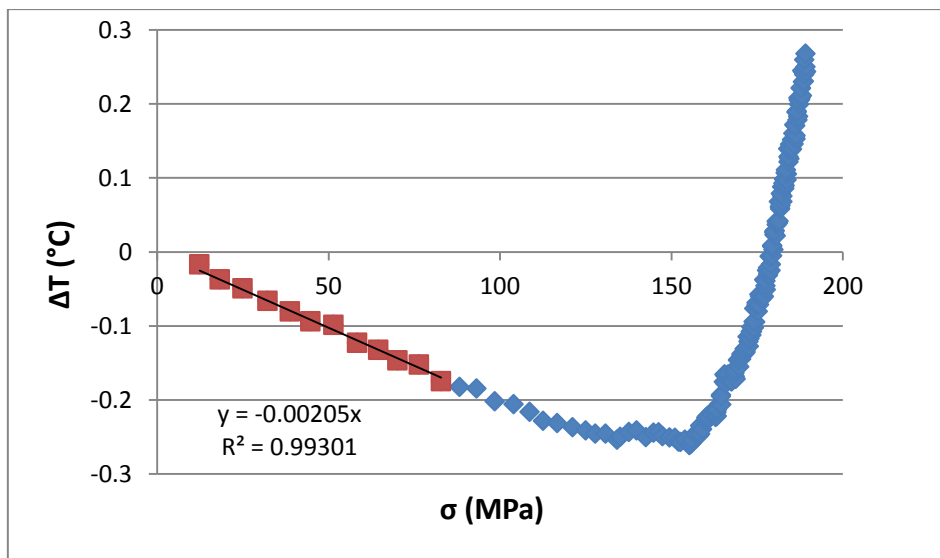


Figura 5.14 ΔT in funzione dello sforzo per la provetta HL2

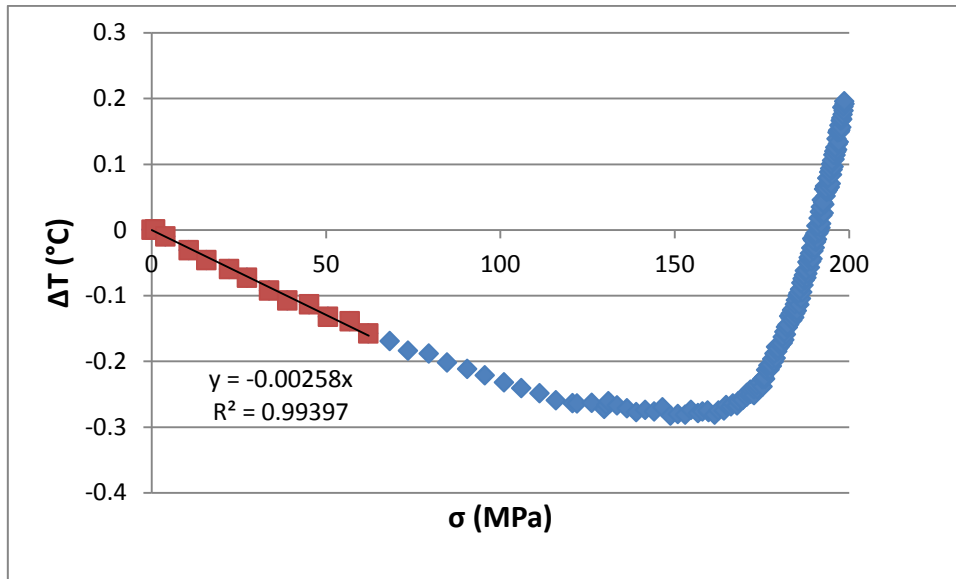


Figura 5.15 ΔT in funzione dello sforzo per la provetta HT1

Si può affermare con buona approssimazione che la variazione di temperatura superficiale rilevata con la termocamera nei primi secondi di prova sia dovuta esclusivamente allo stato di sforzo che interessa il foglio di acciaio posto frontalmente alla camera. Di conseguenza si può calcolare la costante termoelastica del materiale utilizzando la legge della termoelasticità valida per materiali isotropi (3.3):

$$\Delta T = -K_m T \sigma_m$$

Nei grafici sopra riportati, la pendenza del tratto lineare è pari al prodotto cambiato di segno della costante termoelastica moltiplicato per la temperatura superficiale. T (K) può essere considerato costante e pari alla temperatura media rilevata durante la fase termoelastica. Eseguendo i calcoli:

Tabella 5.5 Costanti termoelastiche

Provetta	HL1	HL2	HT1
K_m (Pa ⁻¹)	$6,60 \cdot 10^{-12}$	$6,90 \cdot 10^{-12}$	$8,69 \cdot 10^{-12}$

I valori ottenuti per le due provette HL1 e HL2 con direzione di rullatura parallela alla direzione di trazione sono abbastanza vicini tra di loro con una differenza del 4%, mentre si osserva una differenza marcata (circa il 30%) con la provetta HT1 la cui direzione di rullatura è perpendicolare a quella di trazione.

5.5. Risultati del danneggiamento controllato sulle lastre

Come descritto in precedenza, le lastre di materiale sono state impattate da un proiettile fatto cadere per gravità da diverse altezze, in modo da poter calcolare l'energia scambiata durante l'urto. Le provette sono state ricavate ritagliando le lastre, in modo da ottenere la zona danneggiata al centro delle stesse.

Sono state testate 11 provette, ogni provetta è stata nominata in base al materiale di cui è composta e alla altezza in centimetri da cui è stato fatto cadere il proiettile che ha creato l'area danneggiata (80, 100, 130):

- 3 provette in materiale ibrido con spessore dei fogli di acciaio di 0,5 mm (H_80, H_100, H_130)
- 3 provette in materiale ibrido con solo un foglio di acciaio da 0,5 mm e il foglio di poliolefina (HM_80, HM_100, HM_130)
- 2 provette in acciaio dello spessore di 1 mm (A1_100, A1_130). *Nota: la prova dall'altezza di 80 cm non è andata a buon fine.*
- 3 provette in acciaio dello spessore di 0,5 mm (A0,5_80; A0,5_100; A0,5_130)

Tabella 5.6 Dati relativi alla caduta del proiettile sulle lastre

Provetta	M_p [Kg]	H_{start} [m]	V_{laser} [m/s]	H_{laser} [m]	U(h_{start}) [J]	E_{imp} [J]
H_80	1,9	0,564	2,200	0,31	10,51	9,30
H_100	1,9	0,764	2,889	0,31	14,24	11,66
H_130	1,9	1,064	3,667	0,31	19,83	17,47
HM_80	0,6	0,663	2,419	0,31	3,90	3,24
HM_100	0,6	0,863	2,778	0,31	5,08	3,80
HM_130	0,6	1,163	3,571	0,31	6,85	5,31
A1_100	1,9	0,764	2,962	0,31	14,24	12,53
A1_130	1,9	1,064	2,484	0,31	19,83	10,05
A0,5_80	0,6	0,663	2,027	0,31	3,90	2,72
A0,5_100	0,6	0,863	2,885	0,31	5,08	3,98
A0,5_130	0,6	1,163	3,571	0,31	6,85	5,31

5.6. Risultati dei test a trazione delle provette con la zona danneggiata

Tutte le prove sono state effettuate con una velocità di trazione pari a 5 mm/min.

La velocità di acquisizione dati della termo camera è stata impostata a 40 Hz, si sono quindi ottenuto un video per ciascuna prova con 40 fotogrammi ogni secondo.

Tutti i video ottenuti sono stati analizzati con il software Altair. Come prevedibile la temperatura superficiale non varia più in modo omogeneo sulla superficie del materiale, ma, analizzando nel dettaglio i fotogrammi relativi ai primi secondi di prova, si osservano andamenti molto diversi fra loro.

Per ottenere dei dati confrontabili tra loro, sono state rilevate 4 zone di particolare interesse:

- 1: La zona in cui è avvenuto l'impatto con il proiettile.
- 2: la zona laterale rispetto al punto in cui è avvenuto l'impatto, in direzione trasversale rispetto a quella di trazione.
- 3: la zona laterale rispetto al punto in cui è avvenuto l'impatto, in direzione longitudinale rispetto a quella di trazione.
- 4: una zona abbastanza distante dal punto di impatto in modo da non essere stata deformata dallo stesso. Viene utilizzata come riferimento.

Le aree prese come riferimento nella zona prossima al punto di impatto (2,3) sono di forma circolare, coprono una superficie di circa 20 mm² e sono state scelte per ogni provetta analizzata in modo empirico. Il software Altair permette di ottenere i dati relativi alla temperatura media all'interno di ogni area selezionata per ogni frame registrato dalla termo camera. Tale software ha permesso di fare diverse analisi sui dati ottenuti dalle registrazioni termografiche: non essendo presenti in letteratura articoli che descrivano un'analisi di questo tipo, sono stati fatti diversi tentativi analizzando la temperatura media di piccole porzioni di superficie a diverse coordinate rispetto al punto di impatto, arrivando a stabilire le quattro zone caratteristiche di cui sopra; la

distanza dal punto di impatto delle zone 2 e 3 sono state stabilite di volta in volta in modo empirico, facendo varie prove e scegliendo la distanza che evidenziasse maggiormente il comportamento caratteristico della temperatura.

Tali dati sono stati riportati in Microsoft Excel, dopo aver individuato con precisione per ogni provetta il fame esatto a cui è iniziato il test, ai valori medi di temperatura di ciascuna area è stato sottratto il valore di temperatura a inizio prova, ottenendo quindi il ΔT .

Di seguito vengono riportati e grafici ottenuti per ciascuna provetta.

Nota: non sono riportati i dati relativi alla provetta HM_80 e A1_100 in quanto sono state danneggiate durante il taglio della lastra

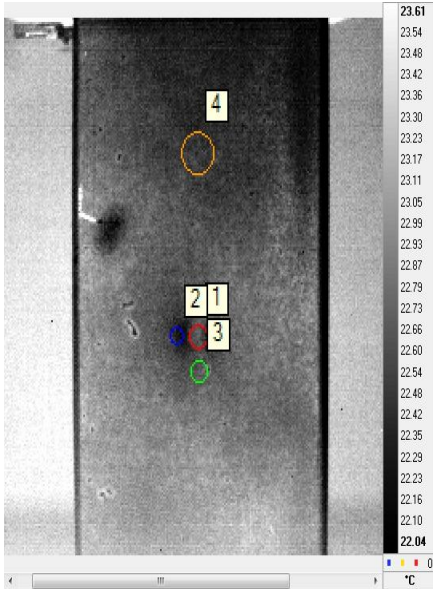


Tabella 5.7 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta H_80

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,07	-0,14	-0,23	-0,24
Tempo (s)	6,16	2,24	4,92	1,48
Sforzo (MPa)	198,52	142,94	189,77	111,79

Figura 5.16 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta H_80

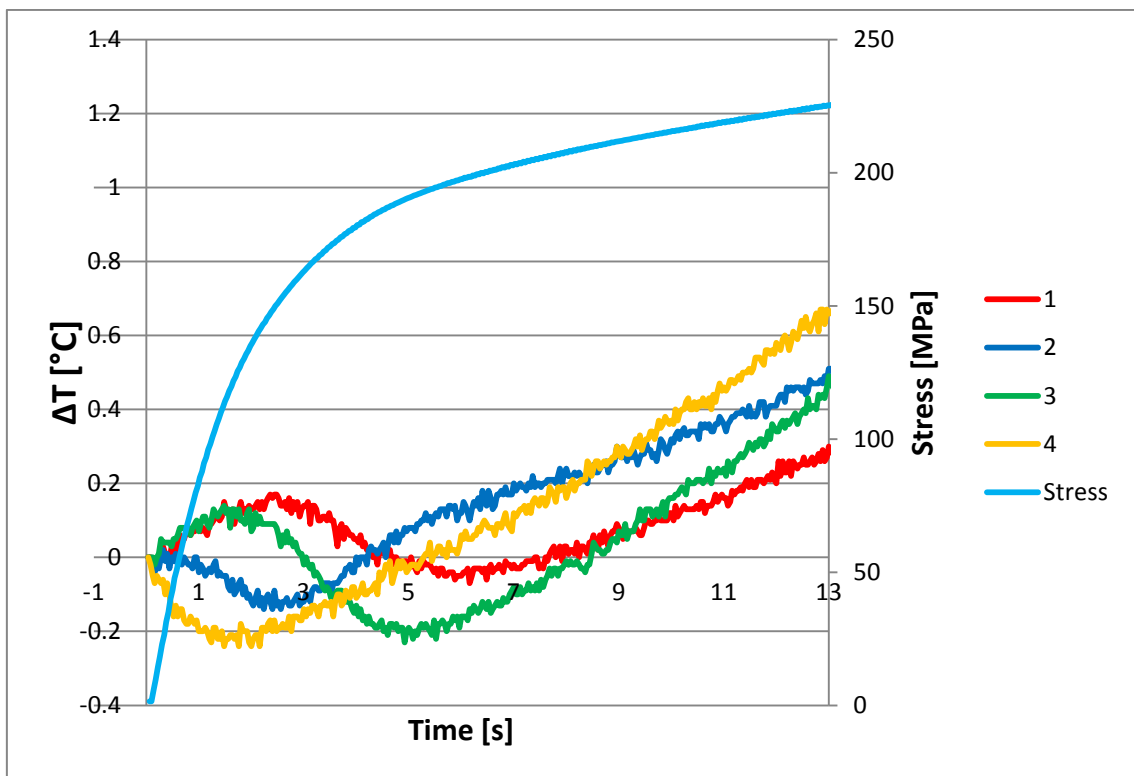


Figura 5.17 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta H_80 nei primi secondi di prova

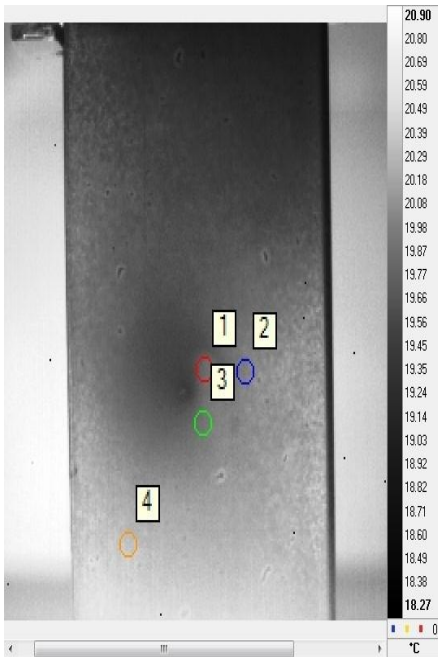


Tabella 5.8 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta **H_100**

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,17	-0,13	-0,25	-0,29
Tempo (s)	5,32	1,84	3,88	1,8
Sforzo (MPa)	191,79	131,15	178,83	129,03

Figura 5.18 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta **H_100**

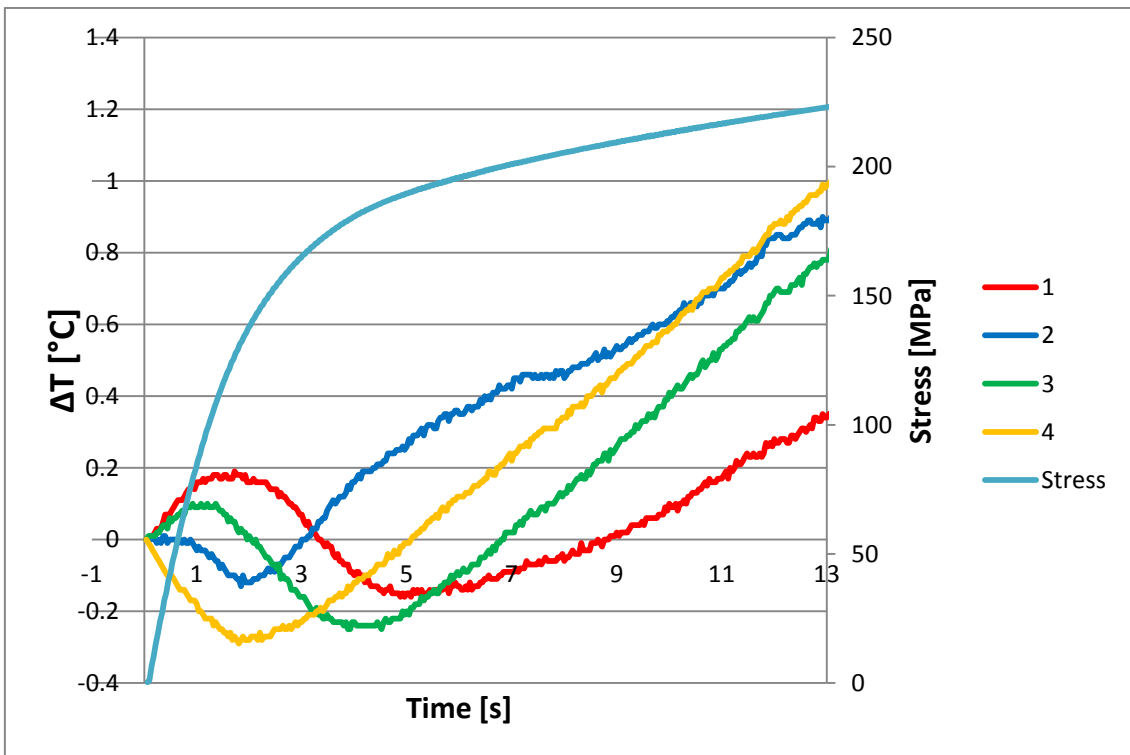


Figura 5.19 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta **H_100** nei primi secondi di prova

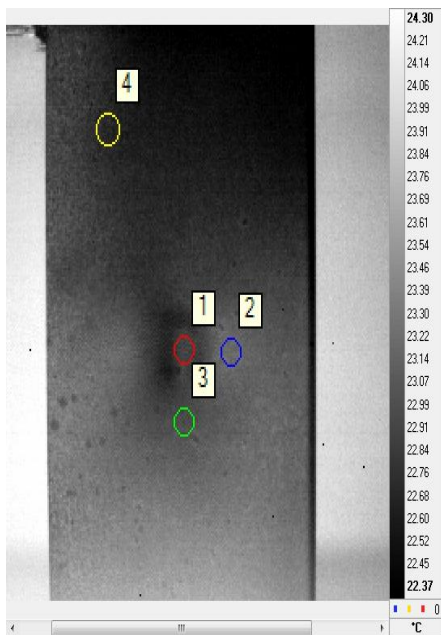


Tabella 5.9 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta **H_130**

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,03	-0,15	-0,31	-0,25
Tempo (s)	7,32	2,64	5,52	1,52
Sforzo (MPa)	199,93	141,86	188,38	103,05

Figura 5.20 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta **H_130**

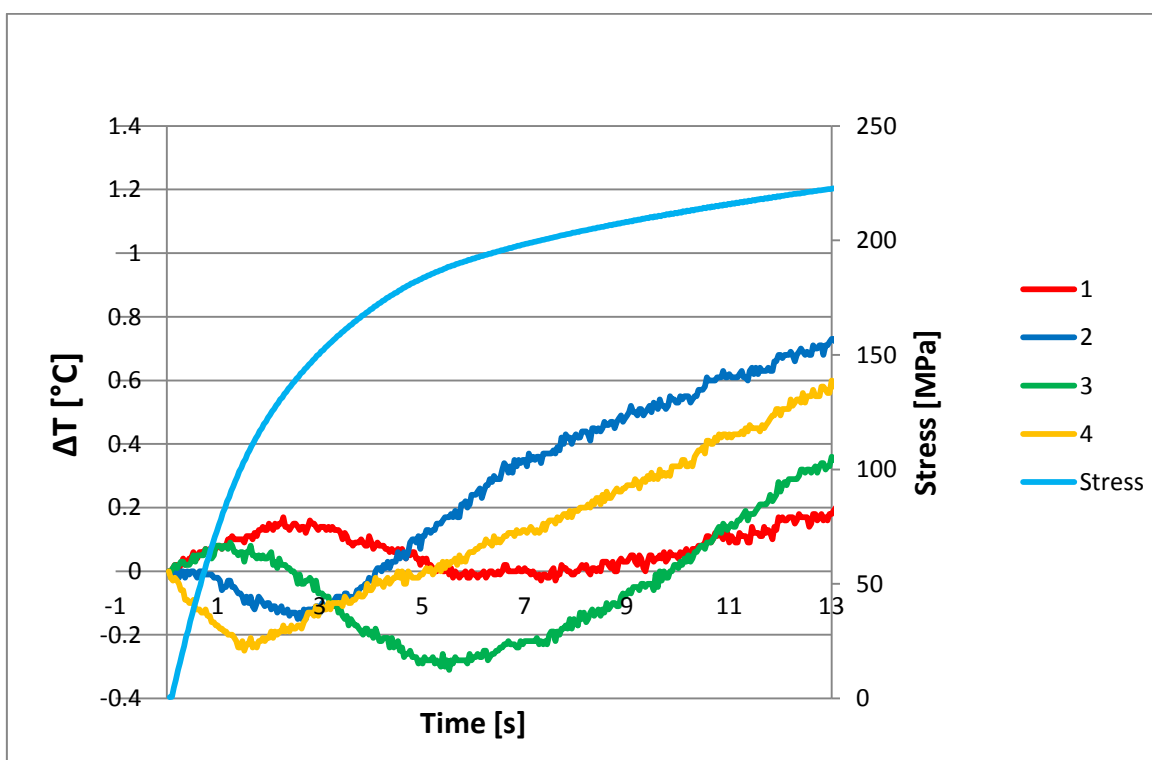


Figura 5.21 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta **H_130** nei primi secondi di prova

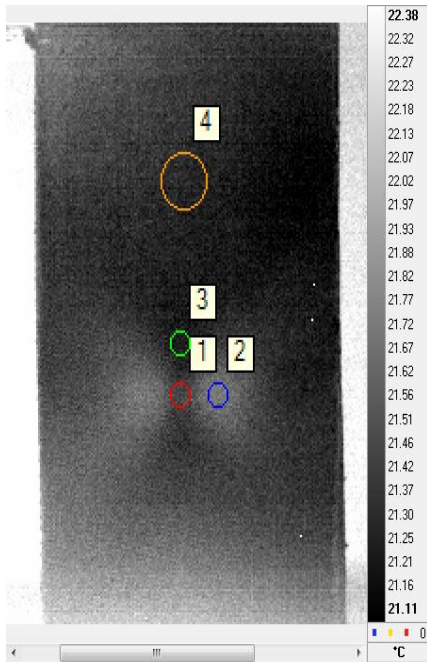


Tabella 5.10 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta HM_100

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,101	-0,102	-0,274	-0,333
Tempo (s)	2,9	1,575	3,425	2,85
Sforzo (MPa)	118,2	64,9	124,3	117,4

Figura 5.22 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta HM_100

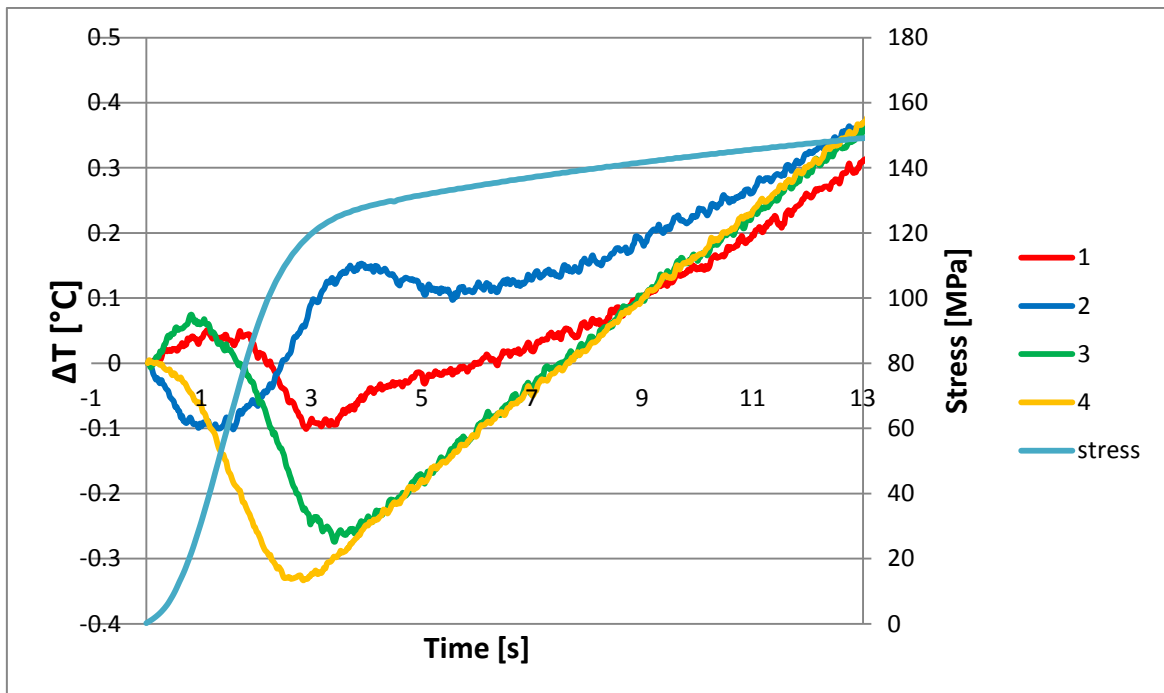


Figura 5.23 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta HM_100 nei primi secondi di prova

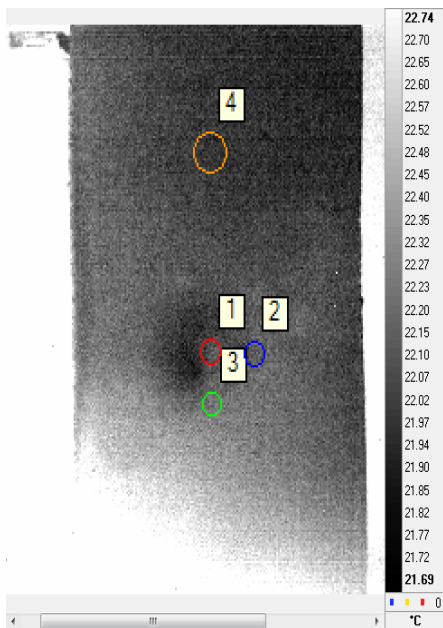


Tabella 5.11 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta **HM_130**

Area	1	2	3	4
ΔT min (°C)	-0,015	-0,230	-0,347	-0,343
Tempo (s)	4,225	1,575	4,125	2,9
Sforzo (MPa)	127,8	79,9	127,3	115,6

Figura 5.24 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta **HM_130**

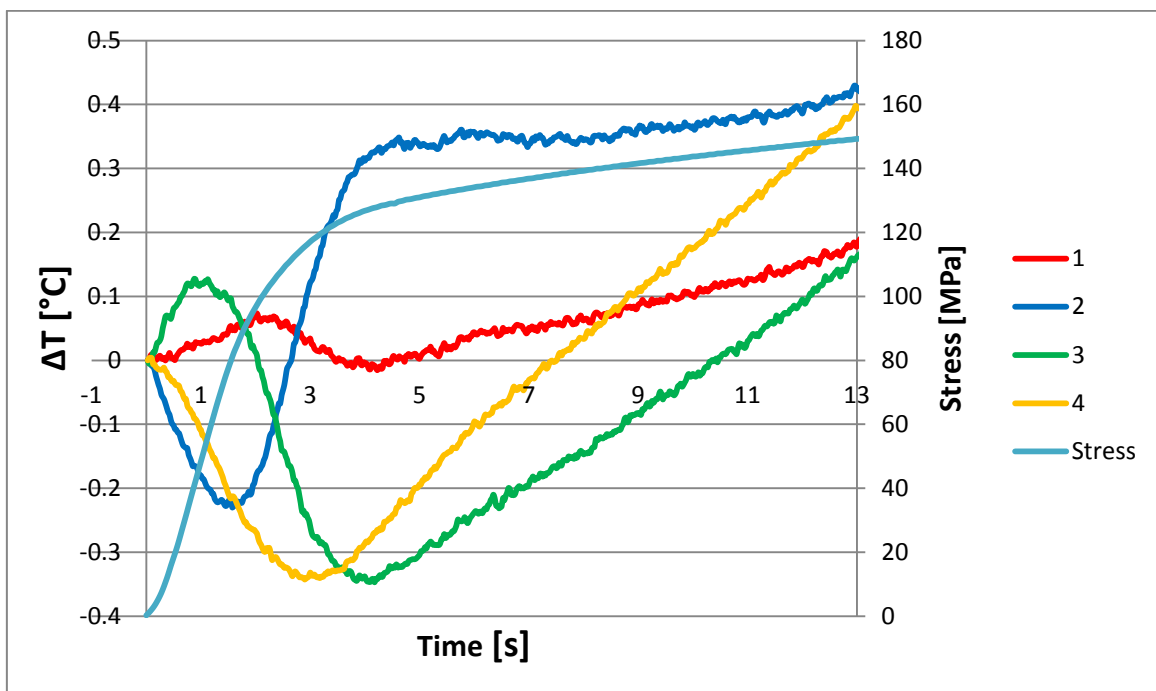


Figura 5.25 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta **HM_130** nei primi secondi di prova

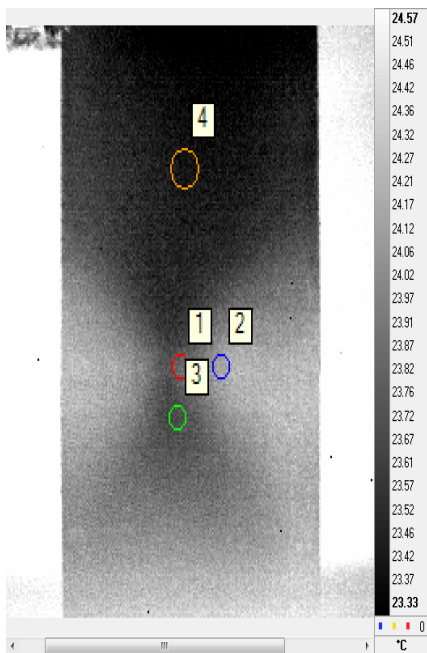


Tabella 5.12 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta A1_130

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,127	-0,215	-0,274	-0,460
Tempo (s)	4,075	1,95	4,825	3,125
Sforzo (MPa)	273,4	201,34	282,5	253,1

Figura 5.26 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta A1_130

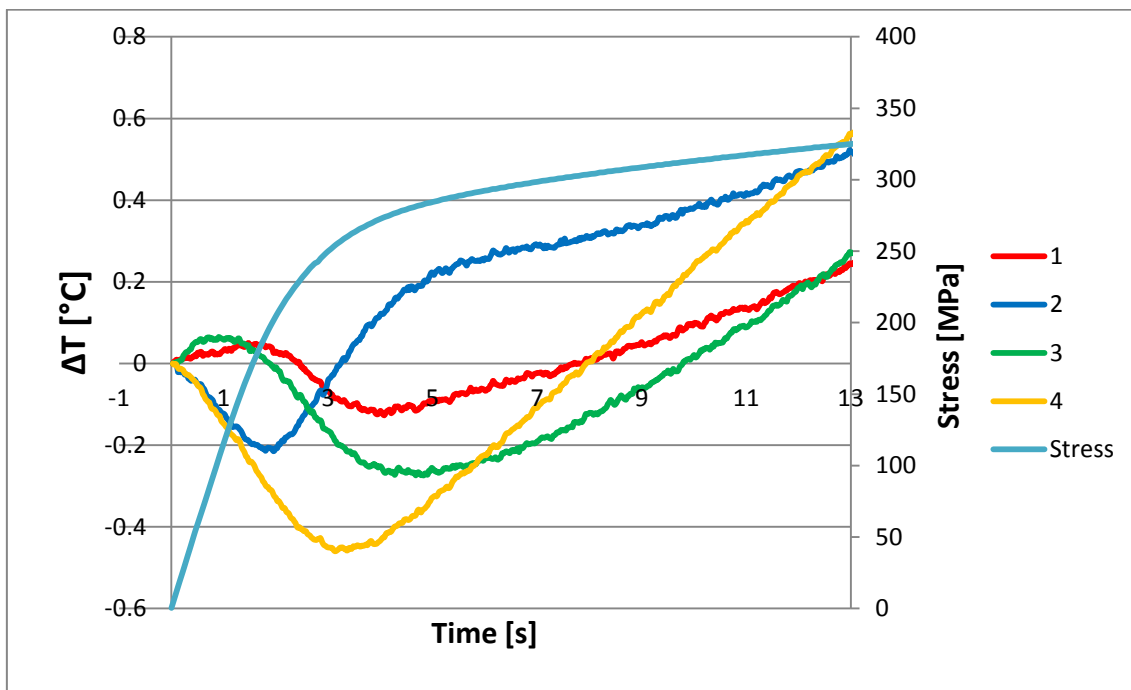


Figura 5.27 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta A1_130 nei primi secondi di prova

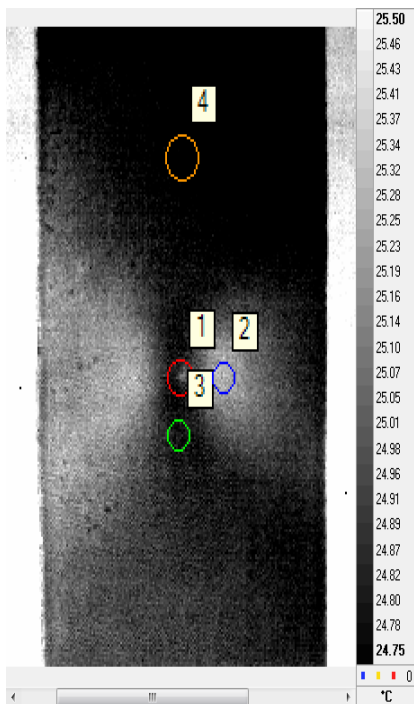


Tabella 5.13 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta A0,5_80

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,126	-0,185	-0,310	-0,341
Tempo (s)	4,3	1,55	4,075	2,925
Sforzo (MPa)	285,3	165,8	282,8	257,8

Figura 5.28 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta A0,5_80

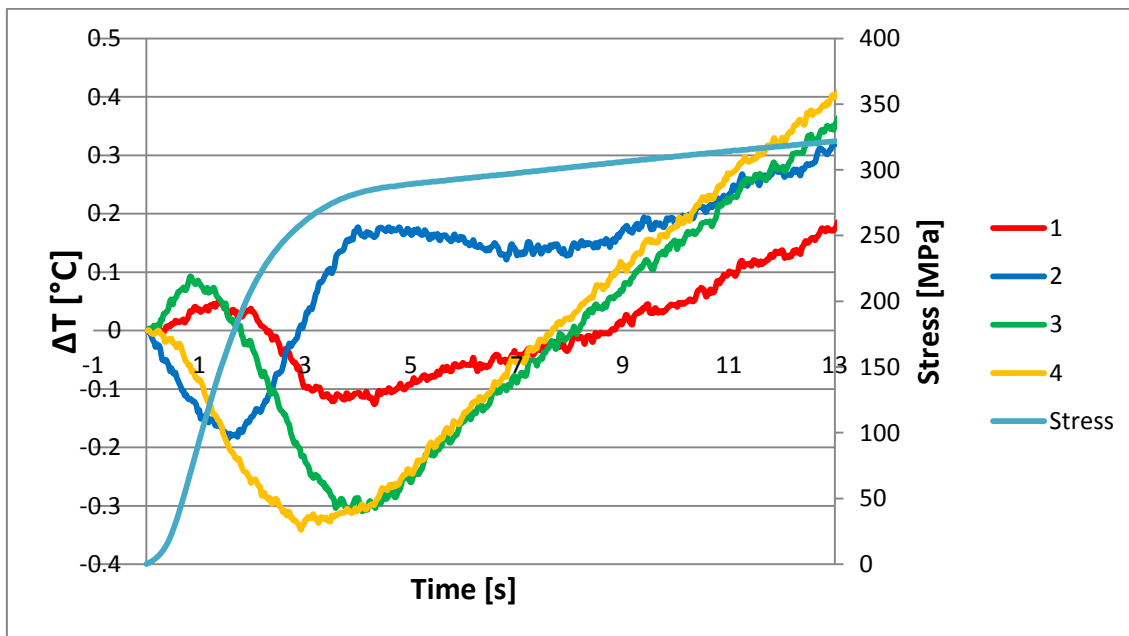


Figura 5.29 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta A0,5_80 nei primi secondi di prova

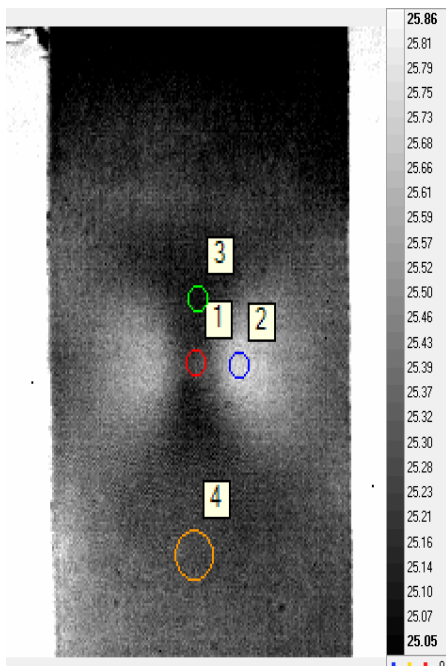


Tabella 5.14 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta A0,5_100

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,095	-0,173	-0,319	-0,317
Tempo (s)	3,95	1,55	4,15	3,4
Sforzo (MPa)	286,0	173,9	288,4	276,6

Figura 5.30 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta A0,5_100

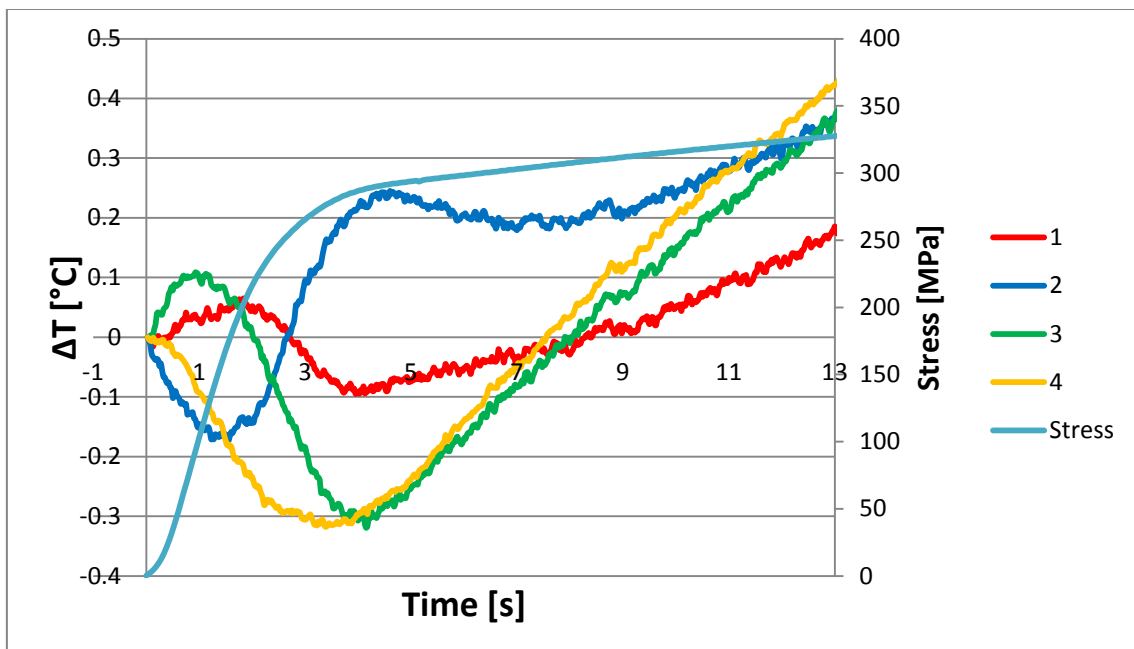


Figura 5.31 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta A0,5_100 nei primi secondi di prova

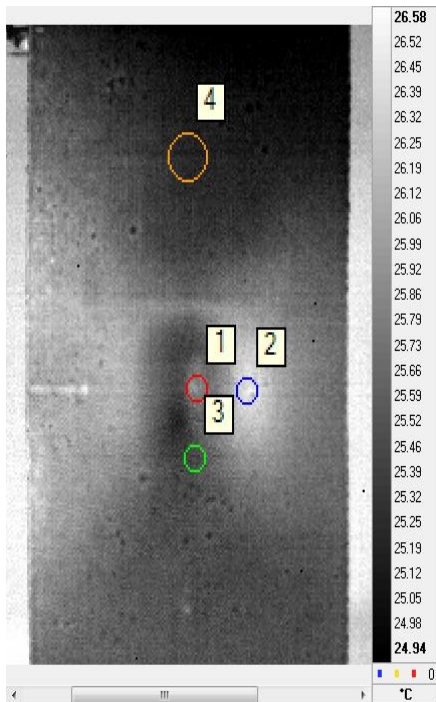


Tabella 5.15 minimo ΔT in funzione della posizione sulla superficie della provetta A0,5_130

Area	1	2	3	4
Min ΔT (°C)	-0,003	-0,131	-0,259	-0,303
Tempo (s)	0,45	1,825	5,4	4,425
Sforzo (MPa)	25,1	171,6	290,1	275,3

Figura 5.32 schermata di selezione delle aree in Altair per la provetta A0,5_130

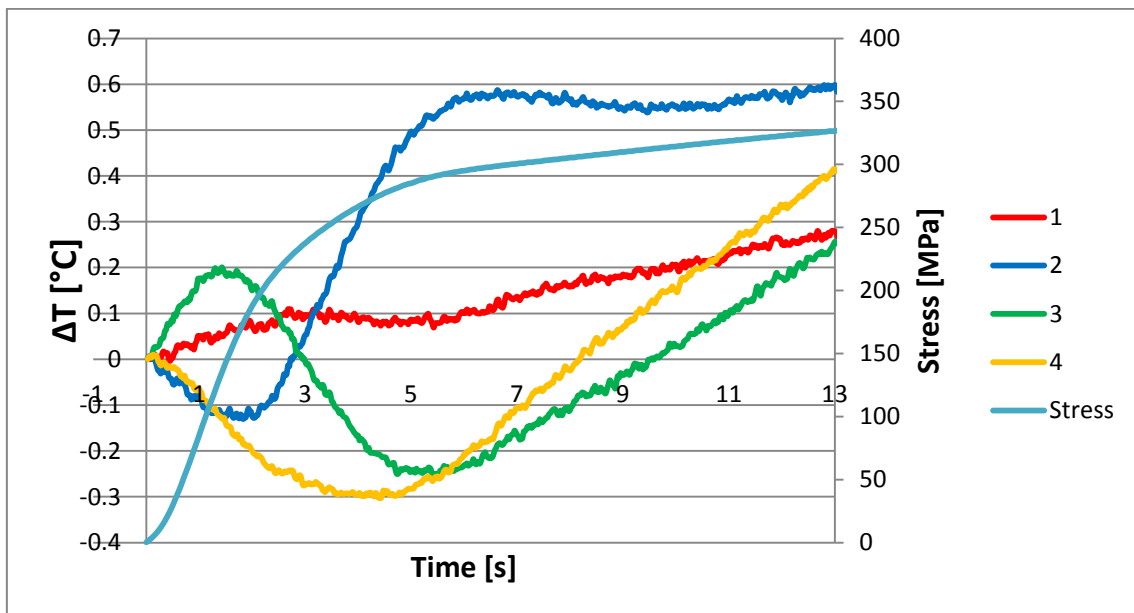


Figura 5.33 Andamento dello sforzo medio e del ΔT sulla superficie della provetta A0,5_130 nei primi secondi di prova

Dai grafici sopra riportati si osserva che la temperatura nell'area lontana dalla zona danneggiata presa come riferimento (curva gialla) si comporta come la temperatura di una provetta non danneggiata, come visto nei test precedenti e in accordo con la teoria della termoelasticità: $\Delta T = -K_m T \sigma_m$.

In questa fase la temperatura decresce linearmente, fino a quando in un qualsiasi punto del materiale si raggiungono tensioni locali tali da creare plasticizzazione, in tale punto il comportamento termico non è più regolato dalla teoria della termoelasticità, le deformazioni plastiche producono calore che nell'ipotesi di plasticizzazione ideale è pari a $dQ = \sigma_p d\varepsilon_p$.

L'andamento della temperatura superficiale non è più lineare, perché diminuisce il volume di materiale con comportamento termoelastico (che si raffredda) ed aumenta il volume di materiale plasticizzato (che si riscalda).

All'aumentare del carico la tensione media raggiunge valori per cui la deformazione plastica è tale che la maggior parte dei cristalli risulta deformata plasticamente, quindi l'effetto termoelastico è trascurabile e si ha riscaldamento di tutto il materiale con un aumento nella temperatura superficiale, fino ad arrivare a valori di ΔT positivi.

Osservando l'andamento della temperature nelle aree adiacenti a quella in cui è avvenuto l'impatto, si nota che nella zona longitudinale (curva verde) la temperatura cresce fino a raggiungere un massimo, poi decresce fino ad un minimo, per poi risalire definitivamente in modo costante. L'andamento della temperatura nella zona trasversale all'impatto con il proiettile (curva blu) mostra un andamento diametralmente opposto a quello descritto precedentemente: la temperatura dapprima decresce fino ad un minimo, poi sale fino ad un massimo, o comunque ad un cambio di concavità nella curva, per poi salire definitivamente in modo costante fino agli istanti precedenti la rottura.

Questo comportamento termico del materiale è spiegato dal fatto che l'impatto del proiettile ha deformato la lastra oltre il limite di snervamento. La lastra è rimasta deformata in modo permanente ed il materiale metallico nell'area circostante il punto di impatto risulta incrudito.

Nei primi istanti della prova di trazione la lastra si comporta in modo simile ad una lastra forata: si ha una intensificazione di sforzi di trazione tangenzialmente all'area deformata che quindi raggiunge rapidamente lo snervamento a bassi valori di sforzo medio con rilascio di temperatura da parte del materiale. Mentre la zona longitudinale al punto di impatto, nei primi istanti di prova subisce uno sforzo di compressione che ne innalza la temperatura, dopo 1-2 secondi dall'inizio della prova, lo sforzo diventa di trazione e la temperatura diminuisce in modo costante fino a che si creano le prime microplasticizzazioni che progressivamente portano all'innalzamento della temperatura.

L'area al centro della zona deformata (curva rossa) mostra un comportamento intermedio tra la curva blu e quella verde, risulta difficile quantificare gli sforzi a cui è soggetta quest'area della provetta nei primi secondi dei test effettuati, si può comunque affermare che gli sforzi risultanti sono di compressione nei primi istanti per poi passare a trazione .

Comparando i grafici si nota inoltre che al crescere dell'altezza da cui è stato fatto cadere il proiettile sulla lastra e quindi al crescere dell'energia di impatto, risultano maggiori anche le variazioni di temperatura nell'area circostante alla zona in cui è avvenuto l'urto, quindi la prova di trazione con termografia IR potrebbe essere utilizzata per valutare l'entità dell'impatto che ha subito una lastra di materiale.

Di seguito è riportata una foto di tre provette al termine delle prove effettuate.

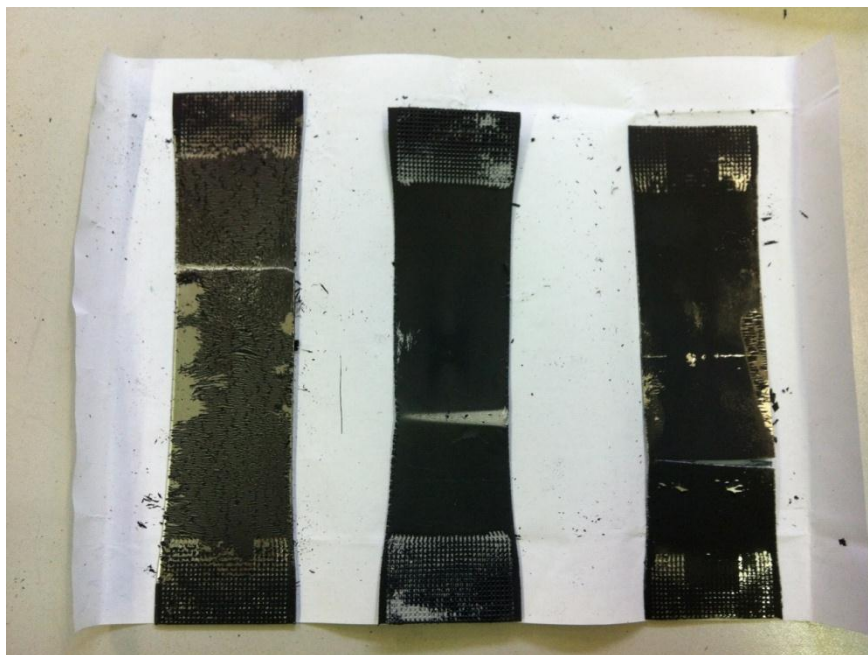


Figura 5.34 Provette portate a frattura al termine della prova di trazione

Come nel caso delle provette di materiale non danneggiato, la frattura è avvenuta in modo duttile ed ha interessato solo i fogli metallici che sono rimasti uniti tra di loro dal materiale polimerico.

La propagazione della cricca e la conseguente frattura è avvenuta indipendentemente dalla posizione in cui era avvenuto l'impatto con il proiettile.

5.7. Analisi della relazione tra l'energia di impatto e la temperatura superficiale durante la prova di trazione

Osservando i grafici relativi alla temperatura superficiale rilevata durante i test a trazione, prendendo in considerazione le aree zona circostante il punto di impatto, in direzione longitudinale (curva verde) e trasversale (curva blu) rispetto alla direzione di trazione, si nota che al crescere dell'altezza dalla quale era stato fatto cadere il proiettile sulla lastra, cresce anche la differenza di temperatura che si registra nell'area attorno al punto in cui era avvenuto l'impatto.

Come mostrato a titolo di esempio nel grafico sottostante (*Figura 5.35*), per confrontare i dati relativi alle diverse provette, si è deciso di prendere come riferimento la differenza tra i ΔT nell'istante t_{\min} al quale viene raggiunto il valore minimo nella curva relativa all'area longitudinale rispetto il punto di impatto, curva verde (3).

$$\Delta T^*(t_{\min}) = \Delta T_2(t_{\min}) - \Delta T_3(t_{\min})$$

Dove ΔT_2 rappresenta i valori della curva blu e ΔT_3 i valori della curva verde.

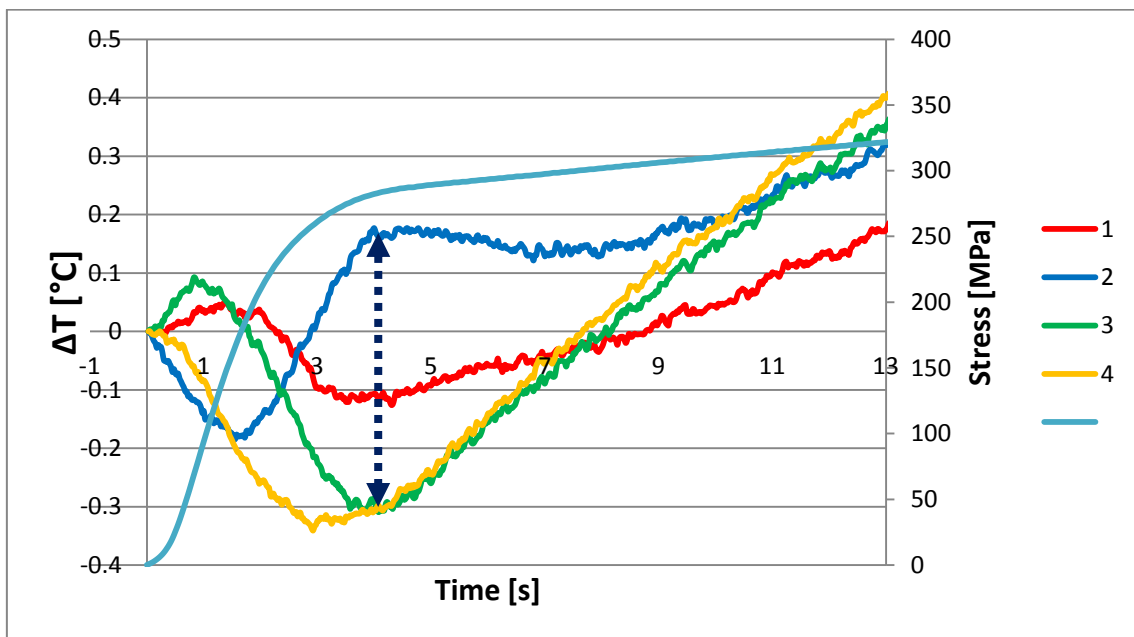


Figura 5.35 riferimento per la comparazione dei risultati

Di sotto vengono riportate le energie relative all'impatto che ha subito ogni provetta e la differenza di temperatura presa come riferimento.

Tabella 5.16 Energia di impatto e ΔT rilevato come in figura 5.18

Provetta	E (J)	ΔT [K]
H_80	9,30	0,31
H_100	11,66	0,40

H_130	17,47	0,48
HM_100	3,80	0,40
HM_130	5,31	0,67
A1_130	10,05	0,47
A0,5_80	2,72	0,47
A0,5_100	3,98	0,54
A0,5_130	5,31	0,78

Questi dati possono essere posti in relazione tra di loro: mantenendoli divisi per tipologia di materiale, e ponendo il ΔT in funzione dell'energia di impatto, si ottiene il seguente grafico:

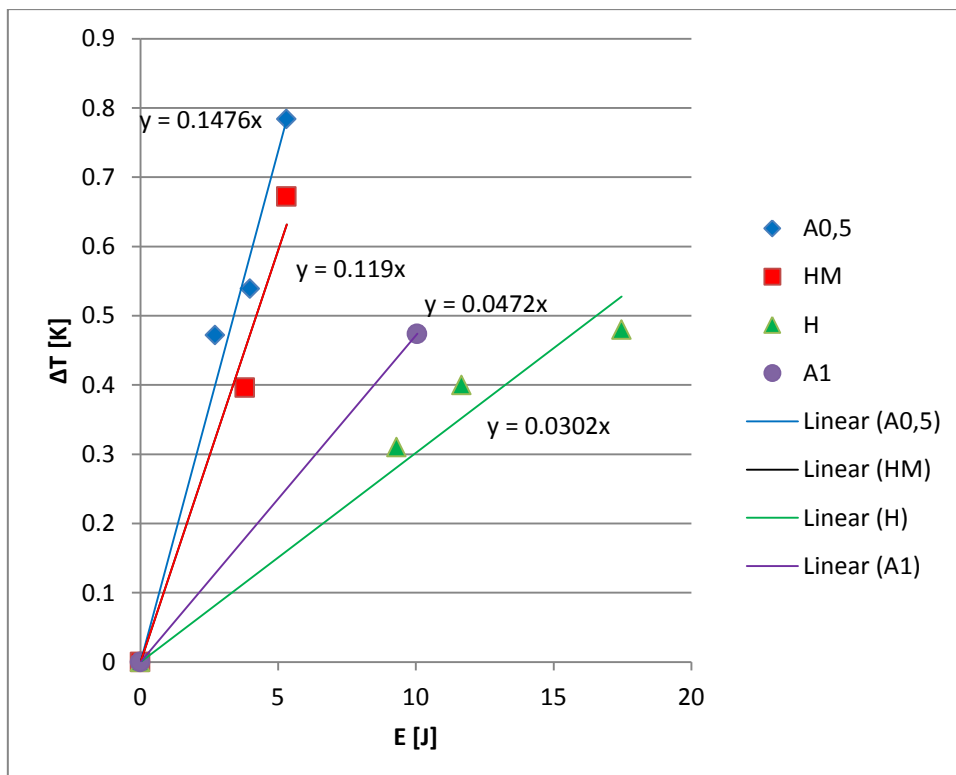


Figura 5.36 ΔT in funzione dell'energia di impatto

Ad energia di impatto nulla e quindi nel caso di provetta integra, il ΔT tra le aree poste in coordinate differenti sulla superficie è nullo (la variazione di temperatura è la stessa su tutta la superficie), sono quindi state create delle linee di tendenza lineari, imponendo l'intersezione con l'origine degli assi.

Anche se i dati a disposizione non sono molti, si può ipotizzare una dipendenza lineare del ΔT in funzione dell'energia di impatto, con pendenze differenti, caratteristiche del materiale e della sua geometria.

Si può affermare che il ΔT così misurato è un indice dell'entità dello snervamento subito dal materiale e quindi che la pendenza della curva caratteristica del materiale e della sua geometria è indice della capacità di resistere alla deformazione provocata da un urto.

Tabella 5.17 Pendenza (A) delle curve caratteristiche del materiale

Materiale	A [$\frac{K}{j}$]
A0,5	0,147
HM	0,119
A1	0,047
H	0,030

Conclusioni

Questo lavoro ha permesso di sviluppare una tematica che non era presente in letteratura, infatti non sono state trovate sperimentazioni che prevedessero un'analisi termografica su di una lastra danneggiata da un impatto durante una prova di trazione.

Il punto di partenza è stato applicare un carico di trazione al materiale composito a sandwich monitorando la temperatura superficiale durante il test avvalendosi di una termo camera.

In questa fase del lavoro si è osservata una curva dello sforzo in funzione del tempo tipica di un materiale duttile, mentre la temperatura superficiale sembra crescere in modo pressoché costante fino a mostrare un picco nell'istante in cui avviene la frattura del materiale. In particolare la frattura interessa solamente i due fogli metallici esterni che rimangono uniti tra di loro dal foglio polimerico che può sopportare deformazioni di gran lunga superiori.

Osservando più nel dettaglio il comportamento termico del materiale durante i primi secondi di prova si osserva che la temperatura prima di cominciare a salire, scende in modo lineare per poi cambiare pendenza e raggiungere un valore minimo. Tale comportamento è dovuto al fatto che durante la fase elastica del materiale, l'aumento di volume provoca una diminuzione della temperatura, quando si sviluppano plasticizzazioni nel materiale si ha sviluppo di calore che porta ad un progressivo aumento nella temperatura superficiale.

Durante la seconda fase della sperimentazione, sono state testate le provette di materiale che hanno subito l'impatto con il proiettile. Analizzando la temperatura superficiale su tutta l'area superficiale si è deciso di prendere come riferimento 4 zone per ogni provetta, è stato quindi riportato in un grafico l'andamento nel tempo della temperatura media di queste aree. Questo procedimento è stato svolto per tutte le provette testate.

Analizzando i grafici è emerso che la lastra di materiale sottoposta alla prova di trazione, si comporta in modo simile ad una lastra forata: l'area laterale al punto di impatto in direzione trasversale rispetto a quella di trazione subisce una intensificazione

di sforzi che la porta a raggiungere rapidamente la plasticizzazione con conseguente aumento di temperatura, mentre l'area al di sotto e al di sopra del punto di impatto subiscono inizialmente sforzi di trazione che portano la temperatura ad aumentare, successivamente con il proseguire della prova, gli sforzi diventano di compressione e la temperatura diminuisce in modo lineare fino all'insorgere delle prime microplasticizzazioni.

Per comparare i risultati ottenuti dalle diverse prove, si è deciso di prendere come riferimento la differenza tra le temperature nell'istante al quale viene raggiunto il valore minimo nella curva relativa all'area longitudinale rispetto il punto di impatto.

Questi valori sono stati posti in un grafico, in funzione delle energie di impatto che avevano provocato la deformazione sul materiale. Si è proposta l'esistenza di una relazione lineare tra il ΔT così misurato e l'energia di impatto. Ogni materiale testato in combinazione alla propria geometria, mostra un proprio caratteristico coefficiente di linearità. Si può affermare che il ΔT così misurato è un indice dell'entità dello snervamento subito dal materiale e quindi che la pendenza della curva caratteristica è indice della capacità di resistere alla deformazione provocata da un urto.

Questa sperimentazione contribuisce allo sviluppo delle tecniche di analisi non distruttive mediante termografia. Pone inoltre le basi per ulteriori sperimentazioni sull'argomento: aumentando il numero di campioni e la tipologia di materiali testati si potranno confermare e rendere maggiormente precisi i dati qui ottenuti. Inoltre, per comprendere con maggiore dettaglio gli sforzi e le deformazioni su tutti i punti della superficie è possibile sviluppare un'analisi avvalendosi di un software di simulazione basato sugli elementi finiti.

Bibliografia

- [1] H. Palkowski, G. Lange, *Austenitic sandwich materials in the focus of reserch*, Istitut fur Metallurgie, TU Clausthal;
- [2] Budynas R., Nisbett K., *Progetto e costruzione di macchine*, seconda edizione, McGraw-Hill, Milano, 2009, pp.82-85;
- [3] Beumler, Th.; *Fibrer Metal Laminates – Application in the Aircraft Construction*, Dresdner, Leichtbausymposium 2001;
- [4] http://www.agy.com/markets/PDFs/NEW_AGY205spaceGLARE.pdf;
- [5] *Ford goes further with prototype electric Ka*, Ford Motor Company, Cologne, April, 2000;
- [6]<http://www.worldstainless.org/Files/issf/nonimagefiles/PDF/TheStainlessSteelFamily.pdf>;
- [7] W. Nicodemi, *introduzione agli acciai inossidabili*, AIM, 2003;
- [8] C.W. Kovach, *High performance stainless steels*, Nickel Development Institute, Toronto;
- [9] <http://www.makeiyfrom.com/material-data>;
- [10] *Ethylene propylene rubbers – Properties and applications of ethylene propylene diene (EPDM) and ethylene propylene copolimers (EPM)*, International Institute of Syntetic Rubber Producers;
- [11] *Ethylene-propylene rubbers & elastomers (EPR/EPDM)*, International Institute of Syntetic Rubber Producers;
- [12] <Http://www.nanoclay.com>;
- [13] H. B. William, *Introduzione alla Chimica Organica*, seconda edizione, EdiSES;
- [14] *Tensione superficiale*, Polymer technology group, Università di Salerno;

- [15] O.Sokolova, A. Carrado, H. Palkowski, *Production of customized high-strength hybrid sandwich structures*, Institute of Metallurgy (IMET), Metal Forming and Processing, Clausthal University of Technology (TUC);
- [16] *Corona treating for coating application*, Enercon Industries Corporation;
- [17] *What is corona treatment and how it works*, Tante Plasma & Corona Treaters;
- [18] A. Risitano, G. Risitano, *L'importanza del "parametro energetico" temperatura per la caratterizzazione dinamica dei materiali*, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università Degli Studi di Catania;
- [19] A. Ajovalasit, G. Pitarresi, *Analisi sperimentale delle tensioni mediante l'effetto termoelastico*, Dipartimento di Meccanica, Università degli studi di Palermo;
- [20] L. Vergani, *Meccanica dei materiali*, seconda edizione, McGraw Hill, Milano, 2006;
- [21] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano, *Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method*, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università Degli Studi di Catania;
- [22] R. J. Greene, E. A. Patterson, R. E. Rowlands, *Thermoelastic Stress Analysis*, Springer Handbook of experimental Solid Mechanics.
- [23] J. Cao, J. L. Grenestedt, *Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls*, Department of Mechanical Engineering and Mechanics, 19 Memorial Drive West, Bethlehem;
- [24] A. Carrado, O. Sokolova, B. Donnio, H. Palkowski, *Influence of corona treatment on adhesion and mechanical properties in metal/polymer/metal systems*, Institute de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare la Prof. Laura Vergani per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro e per il i suoi preziosi consigli.

Ringrazio l'Ing. Chiara Colombo per le tante ore dedicate alla mia tesi, per la sua grande disponibilità e per il suo supporto.

Ringrazio l'Ing. Giorgia Gobbi per il grande aiuto che mi ha dato durante lo svolgimento delle prove sperimentali.

Ringrazio il Prof. Antonio Salerno per aver messo a disposizione la strumentazione termografica e per il tempo dedicato durante lo svolgimento delle prove sperimentali.

Ringrazio Watts Industries Italia S.r.l. per avermi inserito nel mondo del lavoro e per avermi dato la possibilità di completare il percorso di studi.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sostenuto e dandomi la possibilità di raggiungere questo importante traguardo.

Ringrazio tutti gli amici per avermi regalato momenti di spensieratezza, facendomi sorridere anche nei momenti più difficili.

Infine, ma non certamente in ordine di importanza, ringrazio Ilaria per avermi supportato e sopportato in questi anni, anche quando, per i tanti impegni universitari e lavorativi, abbiamo trascorso poco tempo insieme o lo abbiamo passato a studiare. Grazie di essere sempre al mio fianco.