

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: L-9

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Tecnologia delle Costruzioni Aerospaziali L

**Proprietà meccaniche a trazione di compositi polimerici
rinforzati con fibre lunghe di carbonio di interesse per il
settore automotive**

Candidato

Brando Tuberosa

Relatore

Prof. Ing. Enrico Troiani

Correlatori

Ing. Sergio Sangiorgi

Ing. Matteo Scafè

Ing. Paolo Marabini

Anno accademico 2011-2012

Sessione I^a

Un particolare ringraziamento
all'Ing. Sergio Sangiorgi,
all'Ing. Matteo Scaf e
e all'Dott. Giancarlo Raiteri
dei Laboratori di Ricerca ENEA
di Faenza
per la gentilissima assistenza
prestata.

Si ringraziano inoltre
l'Ing. Paolo Marabini
e l'Ing. Roberto Dlacic
della
Scuderia Toro Rosso Spa.

The logo for ENEA, consisting of the letters 'E', 'N', 'E', and 'A' in a bold, blue, sans-serif font. The 'E' and 'A' are stylized with a slight gap at the bottom.

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

The logo for Scuderia Toro Rosso, featuring the word 'SCUDERIA' in a small, black, sans-serif font above the word 'Toro-Rosso' in a large, bold, red font. A red bull is positioned above the 'o' in 'Toro', and a red bull is positioned above the 'o' in 'Rosso'. A red arrow points to the right from the end of the word 'Rosso'.

INDICE

1 Introduzione	pag.1
2 Materiali compositi, proprietà e settori d'interesse	pag.3
2.1 Che cos'è un materiale composito?	pag.3
2.2 Fibre e matrici.....	pag.4
2.2.1 Denominazioni.....	pag.4
2.2.2 Fibre.....	pag.4
2.2.3 Materiali delle matrici polimeriche.....	pag.10
2.3 Principali proprietà fisiche.....	pag.12
2.4 Proprietà degli strati.....	pag.14
2.4.1 Isotropia e anisotropi.....	pag.14
2.4.2 Materiali isotropi.....	pag.17
2.4.3 Materiali anisotropi.....	pag.19
2.5 Caratteristiche del binomio rinforzo-matrice.....	pag.19
2.5.1 Rapporto di massa.....	pag.20
2.5.2 Rapporto volumetrico.....	pag.20
2.5.3 Spessore di lamina.....	pag.21
2.6 Strato unidirezionale.....	pag.22
2.6.1 Modulo elastico.....	pag.22
2.6.2 Carico di rottura di uno strato unidirezionale.....	pag.25
2.6.3 Esempi.....	pag.27
2.7 Tessuti.....	pag.27
2.7.1 Modulo elastico di uno strato di tessuto.....	pag.29
2.7.2 Esempi.....	pag.30
2.8 Possibili utilizzi.....	pag.31
2.9 Vantaggi e svantaggi dell'impiego di compositi.....	pag.33
2.10 Problematiche legate all'impiego di compositi.....	pag.35
3 Normative	pag.37
3.1 ASTM D 3039/D 3039M – 08 e suoi scopi.....	pag.37
3.1.1 Terminologia.....	pag.38
3.1.2 Sintesi del metodo di prova.....	pag.39
3.1.3 Significato ed uso.....	pag.39
3.1.4 Apparato.....	pag.40
3.1.5 Specifiche e numero dei provini.....	pag.42
3.1.6 Procedura e parametri di prova.....	pag.44
3.1.7 Elaborazione dei dati sperimentali.....	pag.47
3.2 ASTM D 3518/D 3518M – 94 e suoi scopi.....	pag.49
3.2.1 Terminologia.....	pag.49
3.2.2 Sintesi del metodo di prova.....	pag.51
3.2.3 Significato ed uso.....	pag.51
3.2.4 Apparato.....	pag.52
3.2.5 Campionamento e specifiche dei provini.....	pag.52
3.2.6 Procedura e parametri di prova.....	pag.53
3.2.7 Elaborazione dei dati sperimentali.....	pag.53
4 Estensimetria	pag.56
4.1 Introduzione.....	pag.56
4.2 Valori caratteristici della resistenza elettrica.....	pag.57
4.3 Circuito di misura, il ponte di Wheatstone.....	pag.60
4.4 Collegamenti.....	pag.62
4.5 Calibrazione del ponte.....	pag.66
4.6 Procedura di incollaggio e collegamento strain gage.....	pag.69
5 Risultati	pag.74
5.1 Dimensioni dei provini.....	pag.74
5.2 Risultati delle prove di trazione.....	pag.85
6 Conclusioni	pag.97
7 Simboli	pag.101
8 Bibliografia	pag.102

1 Introduzione

L'interesse per gli argomenti trattati in questo testo deriva dalla curiosità didattica nata durante il periodo di lezione del corso di Tecnologia delle Costruzioni Aerospaziali.

L'elaborato seguente è la conclusione dell'esperienza di tesi svolta presso il Laboratorio di Ricerca ENEA con sede a Faenza, con il contributo fondamentale della Scuderia Toro Rosso Spa, che ha fornito i provini dei materiali per le prove di trazione.

Negli ultimi decenni i materiali compositi sono progrediti dall'essere quasi una mera curiosità ingegneristica ad essere diffusamente utilizzati in applicazioni che vanno dal settore aerospaziale, all'industria automobilistica, alle costruzioni civili, fino a coprire molti altri aspetti della vita quotidiana. Se, inoltre, si considera che il loro costo di produzione è calato e la loro importanza economica è cresciuta, la loro rilevanza risulta ancor più evidente.

In particolare, nel settore dell'industria automobilistica e motociclistica, vi è un interesse crescente per quanto riguarda l'uso di materiali compositi rinforzati da fibre.

L'applicazione dei materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre nelle auto può seguire due strade:

- La creazione di nuovi componenti o la sostituzione diretta di quelli esistenti.
- L'integrazione di una molteplicità di parti in metallo in un'unica struttura in composito.

La possibilità di ottenere materiali leggeri che permettessero un risparmio di carburante, è stata, ed è tutt'ora, uno dei punti forza per lo sviluppo dei compositi nelle auto, sia nelle competizioni che nella produzione di serie. La sostituzione di componenti con altri realizzati in composito e quindi più leggeri, non solo contribuisce al risparmio energetico, ma si ripercuote anche nelle dimensioni del motore, del

sistema frenante e dei serbatoi che potranno così subire sensibili riduzioni. Un peso ridotto migliora anche le prestazioni dinamiche del veicolo rendendolo più maneggevole e reattivo.

I vantaggi derivanti da una maggiore integrazione strutturale permettono di ridurre in modo significativo il numero delle singole operazioni di produzione e spesso anche il costo finale del componente.

I materiali compositi rinforzati con fibre trovano quindi vasto impiego in elementi non strutturali (ovvero non soggetti a sicurezza critica), quali: parti di carrozzeria, paraurti, spoilers, sedili e quadri comandi. Si hanno poi applicazioni anche in componenti tipicamente strutturali come le molle per sospensioni, i cerchioni, gli organi di trasmissione, giungendo in alcuni casi fino all'intero telaio.

Bisogna però tener presente che vi sono differenze notevoli per quanto riguarda l'applicazione dei compositi in campo aeronautico rispetto all'industria automobilistica. La differenza più evidente è legata alle richieste produttive dei due settori: in aeronautica il progetto strutturale viene ottimizzato per raggiungere determinate prestazioni richieste e in base a questo viene selezionato il processo produttivo più adatto, ma spesso anche il più costoso in termini di tempo e risorse. Al contrario, l'industria automobilistica richiede una velocità di produzione maggiore in grado di fornire i componenti che rientrino in un determinato costo unitario. Quindi, per prima cosa, vengono selezionati i processi produttivi in base ai volumi richiesti e la progettazione del componente dovrà adattarsi al processo di fabbricazione individuato.

Il discorso cambia drasticamente quando si passa alle vetture da competizione ed alle supercar. In Formula 1 i compositi a fibra di carbonio vengono utilizzati per la totalità delle strutture che compongono la vettura, anche per particolari piccoli e non strutturali quali la pedaliera, il volante o i condotti di ventilazione dei freni. In questo caso si torna ad una progettazione pensata utilizzando le metodologie e le tecnologie aeronautiche.

2 Materiali compositi, proprietà e settori d'interesse

2.1 Che cos'è un materiale composito?

Con il termine materiale composito, si indica un materiale che è sostanzialmente differente dai comuni materiali di natura omogenea. La parola composito significa che due o più materiali sono combinati su scala macroscopica per formare un terzo materiale con caratteristiche differenti da quelle dei materiali di partenza.

In questa tesi sono stati considerati materiali compositi caratterizzati da fibre (lunghe o corte) immerse in un materiale che prende il nome di matrice (vedi Figura 2.1). La matrice serve a proteggere, mantenere in posizione le fibre e soprattutto a trasferire ad esse il carico il più omogeneamente possibile.

Grazie alla loro progettabilità, con i materiali compositi si riescono ad ottenere elevate resistenze meccaniche associate a pesi contenuti. Ulteriori vantaggi riguardano poi ottimi comportamenti a fatica ed elevate resistenze ad usura e corrosione, associati a bassi coefficienti di dilatazione termica.

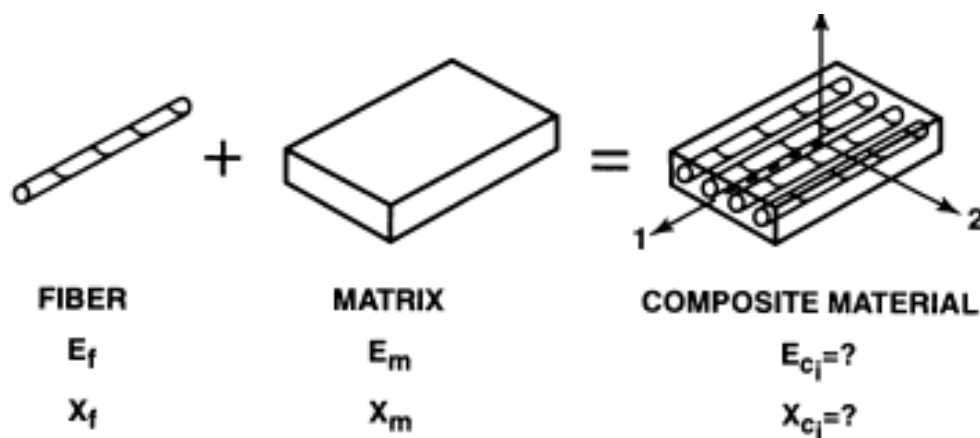


Figura 2.1, materiale composito.

2.2 Fibre e matrici

Il legame tra fibre e matrici viene creato durante il processo di manifattura. Questa fase ha un'influenza fondamentale sulle proprietà meccaniche del materiale composito.

2.2.1 Denominazione

Il modo comune di denominazione dei materiali compositi è quello fibra/matrice. Nella Tabella 2.1 sono riportate le denominazioni dei sistemi fibre/matrice più comuni utilizzati per la fabbricazione dei materiali compositi a matrice polimerica, che sono oggetto della presente tesi.

Tabella 2.1, nomenclatura fibre.

Nomenclature	Equivalent Nomenclature
Graphite/epoxy (Gr/Ep)	Carbon fiber composite (CFC) Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)
Boron/epoxy (B/Ep)	Boron fiber-reinforced plastic (BFRP)
Aramid/epoxy (Ar/Ep)	Kevlar/epoxy PRD-49/epoxy
Glass/epoxy	Glass fiber-reinforced plastic (GFRP or GRP)

2.2.2 Fibre

Le fibre consistono in filamenti, con un diametro in genere compreso tra 5 e 15 micrometri (a seconda del tipo di fibre considerato), permettendo così di essere prodotti usando macchine tessili. Queste fibre sono vendute nelle seguenti forme:

- Fibre corte, con una lunghezza di alcuni centimetri o di frazioni di millimetri, sono impiegate nei processi di injection molding.
- Fibre lunghe, vengono tagliate durante il processo di fabbricazione del materiale composito, sono usate così come si presentano o sotto forma di tessuti.

Le principali tipologie di fibre sono:

- Vetro, i filamenti sono ottenuti tirando il vetro (silicio+carbonato di sodio e carbonato di calcio) ad una $T > 1200^{\circ}\text{C}$ attraverso dei piccoli orifizi di 1-2mm di diametro creati in una piastra di lega di platino.
- Aramidiche o Kevlar®, prodotte da poliammidi aromatiche e caratterizzate da un alto modulo elastico.
- Carbonio, ottenute da filamenti di poliacrilonitrile (PAN, ottenuto da residui di prodotti del petrolio) che vengono ossidati ad alta temperatura (300°C) e poi riscaldati ulteriormente fino a 1500°C in un'atmosfera di azoto. Il processo PAN è illustrato in Figura 2.2 e può essere ottimizzato per produrre fibre ad alta resistenza (HS, high-strength) o ad alto modulo (HM, high-modulus), a seconda della temperatura di pirolisi, come mostrato in Figura 2.3. Si ottengono così catene esagonali composte da atomi di carbonio (Figura 2.4), che assieme formano la fibra di aspetto nero lucido e con un diametro tipico di $8\mu\text{m}$.
- Boro, realizzate tramite un filamento di tungsteno (diametro 8-12 μm) funge da substrato per la reazione di catalizzazione tra il cloruro di boro e l'idrogeno a 1200°C . Le fibre di boro così ottenute hanno un diametro di circa 100 μm .
- Carburo di silicio (resistente alle alte temperature), il cui processo di fabbricazione è simile alle fibre di boro, deposizione chimica di vapori di metiltriclorosilano e idrogeno su un substrato di tungsteno o carbonio. Hanno un diametro tipico di 0,1mm.

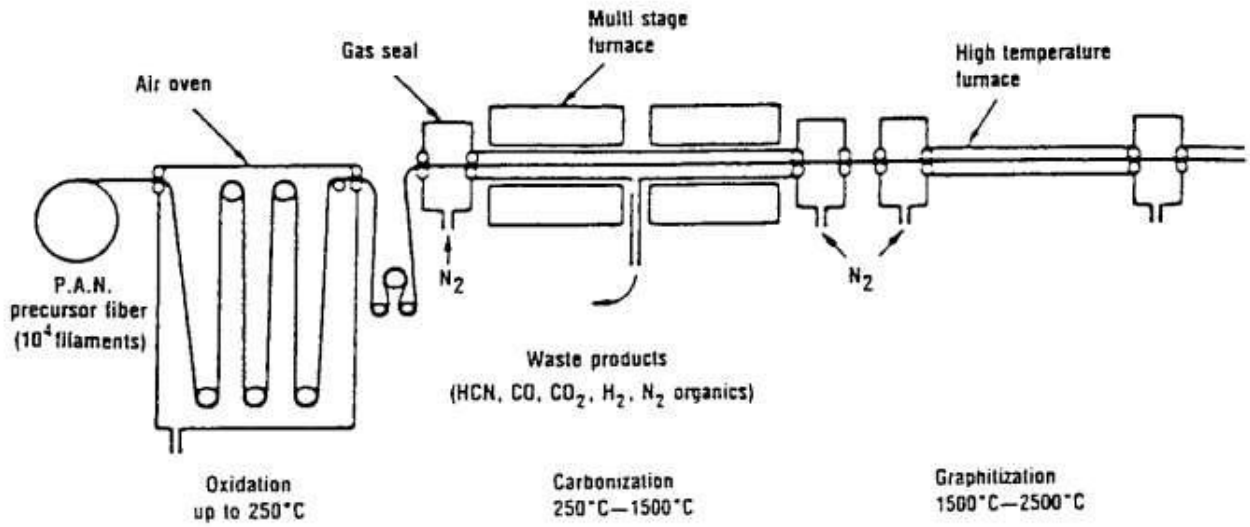


Figura 2.2, procedimento PAN.

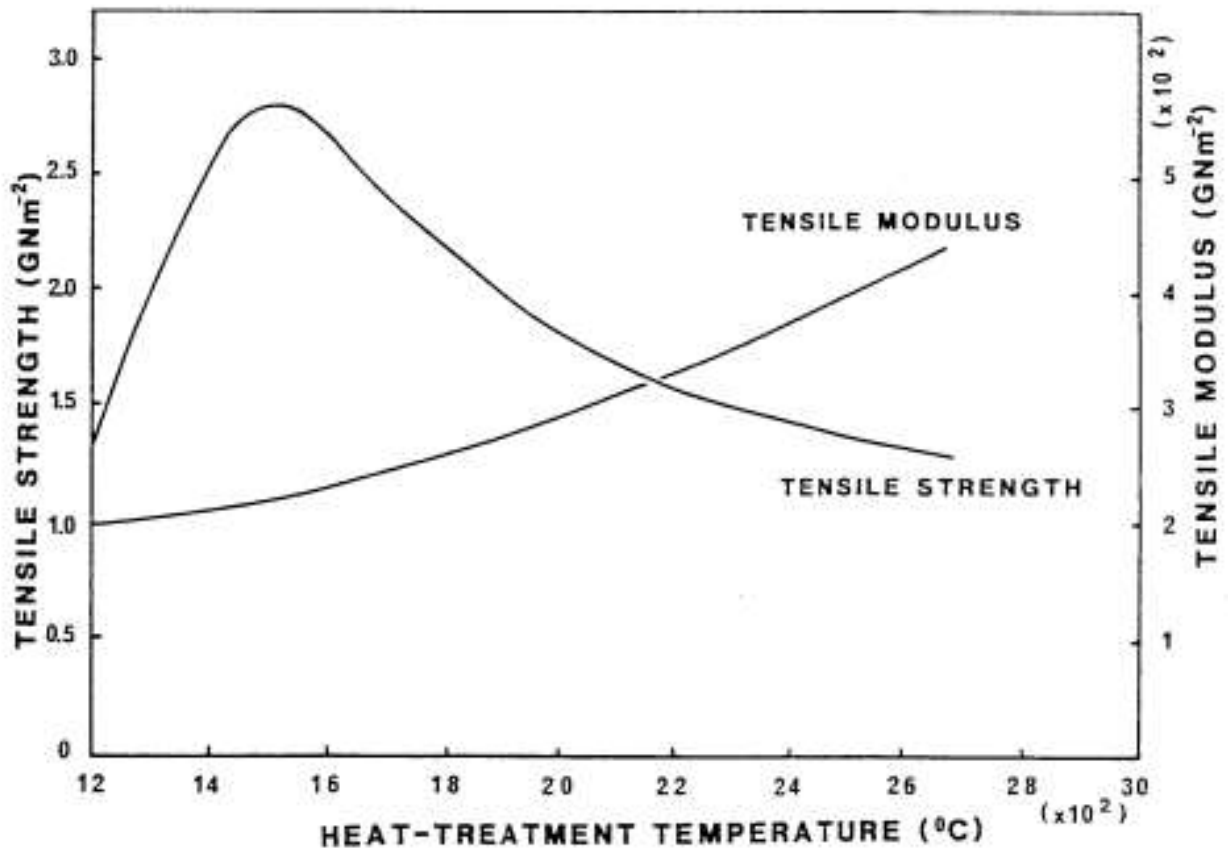


Figura 2.3, proprietà delle fibre di carbonio a seconda della temperatura di pirolisi.

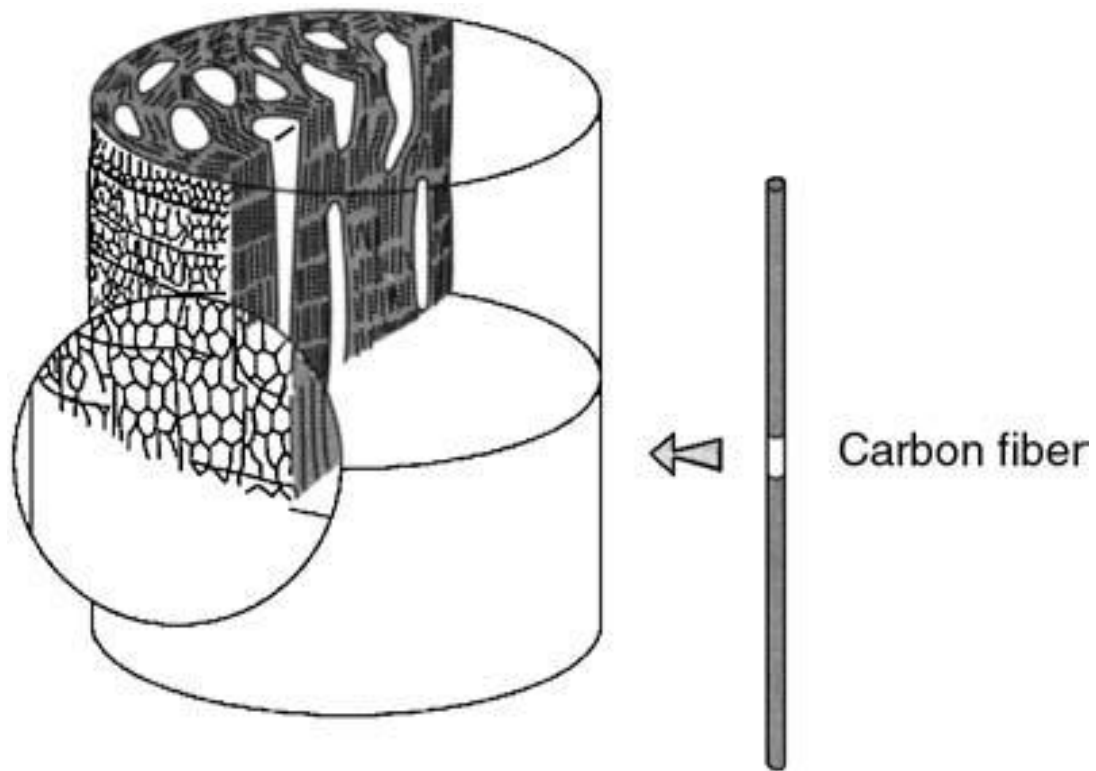


Figura 2.4, fibra di carbonio formata da catene esagonali.

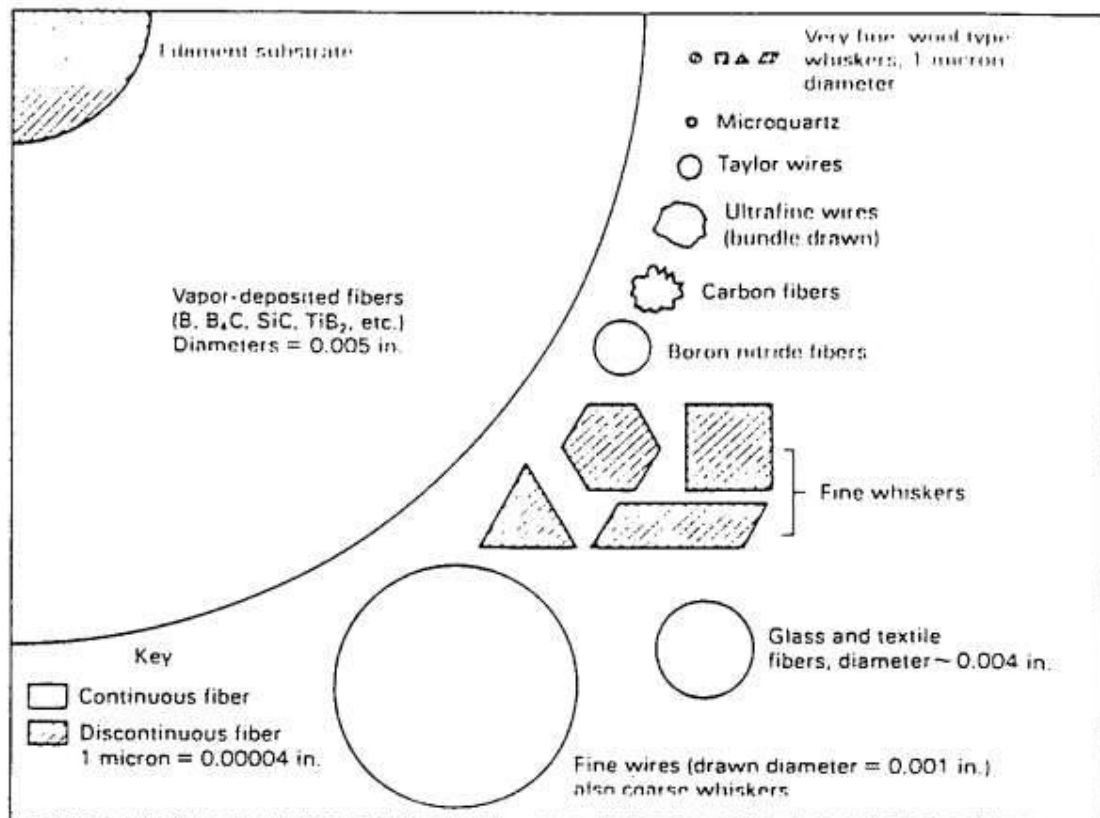
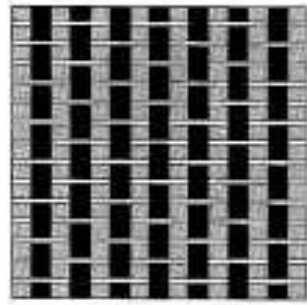


Figura 2.5, comparazione in scala della sezione delle fibre descritte.

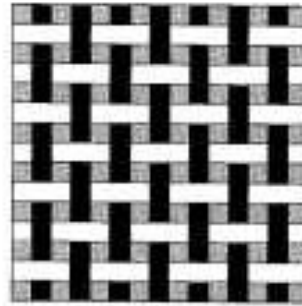
Fibre leggere si ottengono generalmente da elementi con basso numero atomico, come carbonio, azoto, ossigeno, berillio, boro e silicio; fra queste le fibre di vetro (principalmente silicio e ossigeno), sono già considerate pesanti.

Le fibre lunghe possono essere assemblate nelle seguenti forme (vedi Figura 2.6) per i processi di fabbricazione dei materiali compositi:

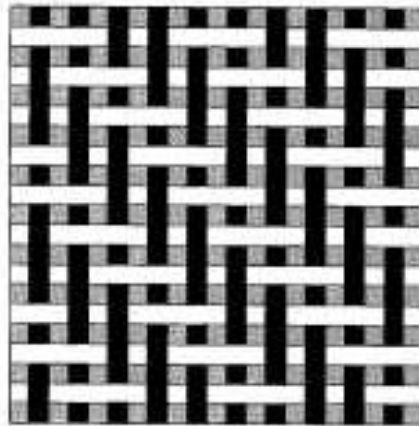
- Unidimensionali: sotto forma di nastri "tows" o uniti a trefolo "yarns".
- Bidimensionali: sia i tows che gli yarns possono essere tessuti, "woven roving" e "cloth".
- Tridimensionali: tessuti con fibre orientate in diverse direzioni (>2)



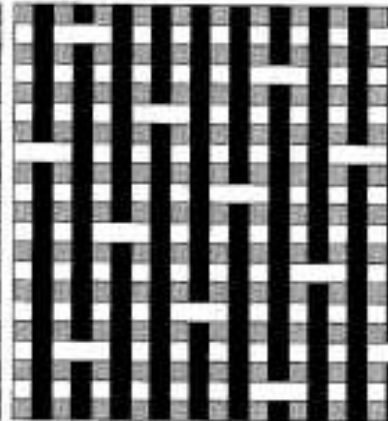
Unidirectional



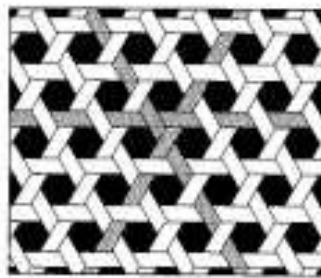
Plain



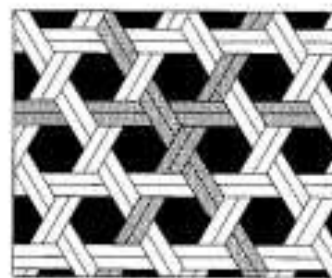
Twill 2.2



Satin 8



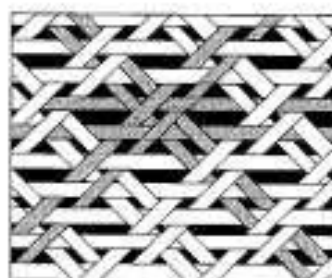
Basic (triaxial) weave



Basic basket weave



Bi-plain weave
(filling 60° to warp)



Bi-plain weave
(filling 45° to warp)

Figura 2.6, possibili disposizioni delle fibre.

Un'altra forma di fornitura delle fibre, mostrata in Figura 2.7, è quella dei nastri, "tape", molto adatta per sistemi di costruzione automatizzati. I nastri possono essere unidirezionali o tessuti tradizionali. Gli unidirezionali contengono solo alcune fibre di trama, necessarie per tenere insieme il nastro, oppure sono forniti su un foglio inerte di supporto. I nastri sono in genere pre-impregnati con il sistema di resina e questo è utile per mantenere la forma della lamina.

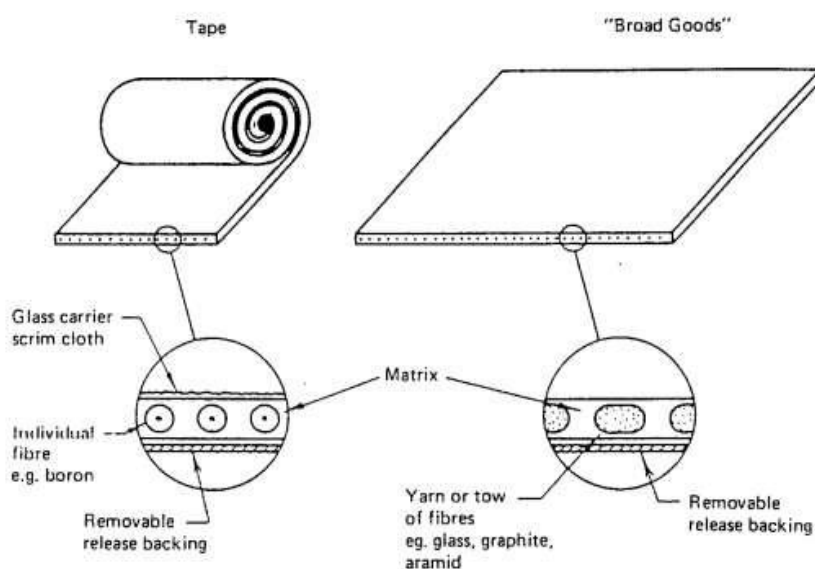


Figura 2.7, fornitura a nastri e lastre.

Prima del processo che porta alla produzione del materiale composito, le fibre sono sottoposte ad un trattamento superficiale per decrescere l'azione abrasiva delle fibre su macchine e stampi impiegati per la lavorazione e migliorare l'adesione tra fibre e il materiale della matrice.

2.2.3 Materiali delle matrici polimeriche

Il materiale ideale per una matrice è un liquido a bassa viscosità che può essere trasformato in un solido resistente, stabilmente ancorato alle fibre di rinforzo.

La matrice ideale deve avere le seguenti caratteristiche:

- Buona resistenza a trazione.
- Elevato modulo elastico.
- Resistenza a taglio.

- Resistenza a frattura e ad impatto.
- Resistenza al degrado termico.
- Resistenza al creep alla temperatura di esercizio.
- Il legame con le fibre deve essere saldo.
- Resistenza al degrado da parte di umidità, di raggi UV, degli agenti chimici e di solventi.
- Deve presentare basso ritiro dimensionale durante la polimerizzazione.
- Sono auspicabili un lungo tempo di conservazione (prima del ciclo di curing), basso peso specifico e basso costo.

I materiali di cui si possono comporre le matrici polimeriche sono i seguenti:

- Resine termoplastiche (polipropilene, poliammidi, polisolfati, polietere-eterechetone, etc.).
- Resine termoindurenti (epossidiche, poliesteri, vinilestere, fenoliche, etc.).

Le resine termoplastiche perdono rigidità se riscaldate, ma induriscono nuovamente a temperatura ambiente. L'interesse per queste resine risiede nel loro maggior allungamento a rottura rispetto alle resine termoindurenti. Sono impiegate per processi automatici con fibre corte e non con fibre lunghe e anche per questo motivo la loro resistenza è generalmente più bassa delle termoindurenti.

Le resine termoindurenti, che cioè polimerizzano in modo irreversibile in seguito alla reazione con un opportuno agente chimico, sono quelle di maggiore impiego; la reazione (curing) può avvenire ad alta temperatura (da cui il termine "termoindurente") ma esistono anche resine "curabili" a temperatura ambiente. Le resine termoindurenti si combinano bene con i rinforzi, hanno buona resistenza, ma l'allungamento a rottura è relativamente basso.

Le proprietà finali della matrice, definite dalla resina e dall'agente di curing, possono essere modificate aggiungendo:

- Diluenti che migliorano la bagnabilità delle fibre, ma che riducono la temperatura massima di impiego del composito.
- Flessibilizzanti che riducono il modulo elastico della resina e aumentano l'allungamento a rottura.
- Agenti che, precipitando nella matrice sotto forma di particelle gommoze, rallentano la propagazione di difetti nella matrice.
- Materiali inerti che modificano la densità, il costo e il modulo elastico del composito.

2.3 Principali proprietà fisiche

Le Tabelle da 2.2 a 2.4 illustrano le singole proprietà dei metalli d'impiego più comune paragonate con i singoli componenti dei materiali compositi, ovvero fibre e matrice. Le caratteristiche dei materiali compositi sono determinate dalla diversa combinazione di fibre e matrice a seconda di:

- Tipologia dei componenti.
- Proporzione tra la percentuale di fibre e matrice.
- Disposizione delle fibre.
- Processo di fabbricazione.

Tabella 2.2, proprietà dei metalli d'impiego comune.

<i>Metals and Alloys</i>	<i>Density ρ (kg/m³)</i>	<i>Elastic Modulus E (MPa)</i>	<i>Shear Modulus G (MPa)</i>	<i>Poisson Ratio ν</i>	<i>Tensile Strength σ_{ult} (Mpa)</i>	<i>Elongation (%)</i>	<i>Coefficient of Thermal Expansion at 20°C α (°C⁻¹)</i>	<i>Coefficient of Thermal Conductivity at 20°C λ(W/m°C)</i>	<i>Heat Capacity c(J/kg°C)</i>	<i>Useful Temperature Limit T_{max} (°C)</i>
Steels	7800	205,000	79,000	0.3	400 to 1600	1.8 to 10	1.3×10^{-5}	20 to 100	400 to 800	800
Aluminum Alloy 2024	2800	75,000	29,000	0.3	450	10	2.2×10^{-5}	140	1000	350
Titanium Alloy TA 6V	4400	105,000	40,300	0.3	1200	14	0.8×10^{-5}	17	540	700
Copper	8800	125,000	48,000	0.3	200 to 500		1.7×10^{-5}	380	390	650
Nickel	8900	220,000			500 to 850			70	500	900
Beryllium	1840	294,000		0.05	200		1.2×10^{-5}	150 (20°C) 90 (800°C)	1750 (20°C) 3000 (800°C)	900
Silicon	2200	95,000				5		1.4 (20°C) 3 (1200°C)	750 (20°C) 1200(500°C)	1300

Tabella 2.3, proprietà delle fibre.

Reinforcements	Fiber Diameter $d(\mu\text{m})$	Density $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	Modulus of Elasticity $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{\text{ult}} (\text{Mpa})$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W}/\text{M}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $c(\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	Price 1993 (\$/kg)
"R" glass, high performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	14
"E" glass, common applications	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1400		70
"HT" graphite, high strength	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	70
"HM" graphite, high modulus	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	140
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	0.4×10^{-5}			500	500
Aluminum	20	3700	380,000			1400	0.4		50 (20°C) 7 (800°C)	900	>1000	
Aluminum silicate	10	2600	200,000			3000	1.5					
Silicon carbide	14	2550	200,000			2800	1.3	0.5×10^{-5}			1300	600
Polyethylene		960	100,000			3000					150	

Tabella 2.4, proprietà delle resine.

Resins	Density $\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	Elastic Modulus $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{\text{ult}} (\text{Mpa})$	Elongation $E\%$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $C(\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	Price 1993 (\$/kg)
<i>Thermosets</i>											
Epoxy	1200	4500	1600	0.4	130	2 (100°C) 6 (200°C)	11×10^{-5}	0.2	1000	90 to 200	6 to 20
Phenolic	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1×10^{-5}	0.3	1000	120 to 200	
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8×10^{-5}	0.2	1400	60 to 200	2.4
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		6×10^{-5}		1200	120	
Vinylester	1150	3300			75	4	5×10^{-5}			>100	4
Silicone	1100	2200		0.5	35					100 to 350	
Urethane	1100	700 to 7000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4000 to 19,000	1100	0.35	70	1	8×10^{-5}	0.2	1000	250 to 300	
<i>Thermoplastics</i>											
Polypropylene (pp)	900	1200		0.4	30	20 to 400	9×10^{-5}		330	70 to 140	
Polyphenylene sulfone (pps)	1300	4000			65	100	5×10^{-5}			130 to 250	
Polyamide (pa)	1100	2000		0.35	70	200	8×10^{-5}		1200	170	6
Polyether sulfone (pes)	1350	3000			85	60	6×10^{-5}			180	25
Polyetherimide (pei)	1250	3500			105	60	6×10^{-5}	0.2		200	20
Polyether-ether-ketone (peek)	1300	4000			90	50	5×10^{-5}	0.3		140 to 250	96

La Figura 2.8, fornisce invece un'interessante vista sulla resistenza specifica dei principali materiali compositi in funzione della temperatura. La resistenza specifica è definita come la resistenza divisa per la densità, σ_{rupt}/ρ .

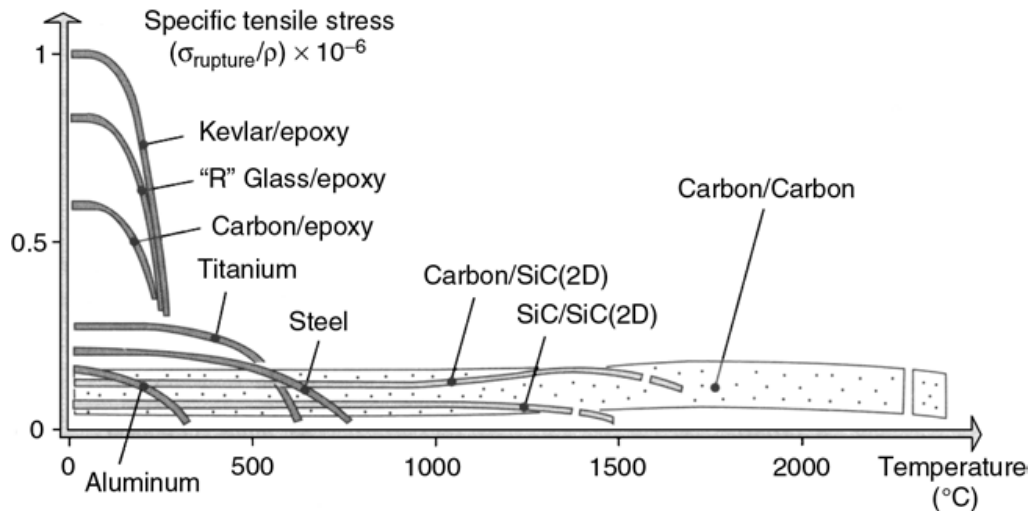


Figura 2.8, resistenza specifica dei materiali compositi e metallici in funzione di T.

2.4 Proprietà degli strati

È di fondamentale importanza per un progettista comprendere e conoscere in maniera accurata le proprietà geometriche e meccaniche del binomio "fibra+matrice" che è la struttura base delle parti in materiale composito. La descrizione di queste caratteristiche è l'oggetto di questo paragrafo.

2.4.1 Isotropia e anisotropia

Quando si studia il comportamento meccanico di corpi elastici sotto carico (teoria elastica), si devono considerare i punti seguenti:

- Un corpo elastico soggetto a un carico si deforma in maniera reversibile.
- In ogni punto del corpo è possibile identificare i piani principali in cui ci sono solo sforzi normali.

- Le direzioni normali a questi piani sono chiamate le direzioni di sforzo principale.
- Una piccola sfera di materiale che circonda un punto del corpo diventa un ellissoide dopo essere stata sottoposta a carico.

La posizione spaziale dell'ellissoide relativo alle direzioni principali di sforzo ci permette di capire se un materiale sotto studio si comporta in maniera isotropa o anisotropa. La Figura 2.9 illustra questo fenomeno.

La Figura 2.10 mostra la deformazione di un campione isotropo e di uno anisotropo. Nel secondo caso, le linee oblique rappresentano le direzioni lungo le quali sono disposte le fibre di rinforzo. Un carico longitudinale applicato ad un provino isotropo produrrà un'estensione nella direzione longitudinale e una contrazione nella direzione trasversale. Lo stesso carico applicato a un provino anisotropo crea una distorsione angolare oltre alla estensione longitudinale e alla contrazione trasversale.

Nel caso semplice di sforzo piano, si può ottenere la costante elastica usando delle relazione sforzo-deformazione.

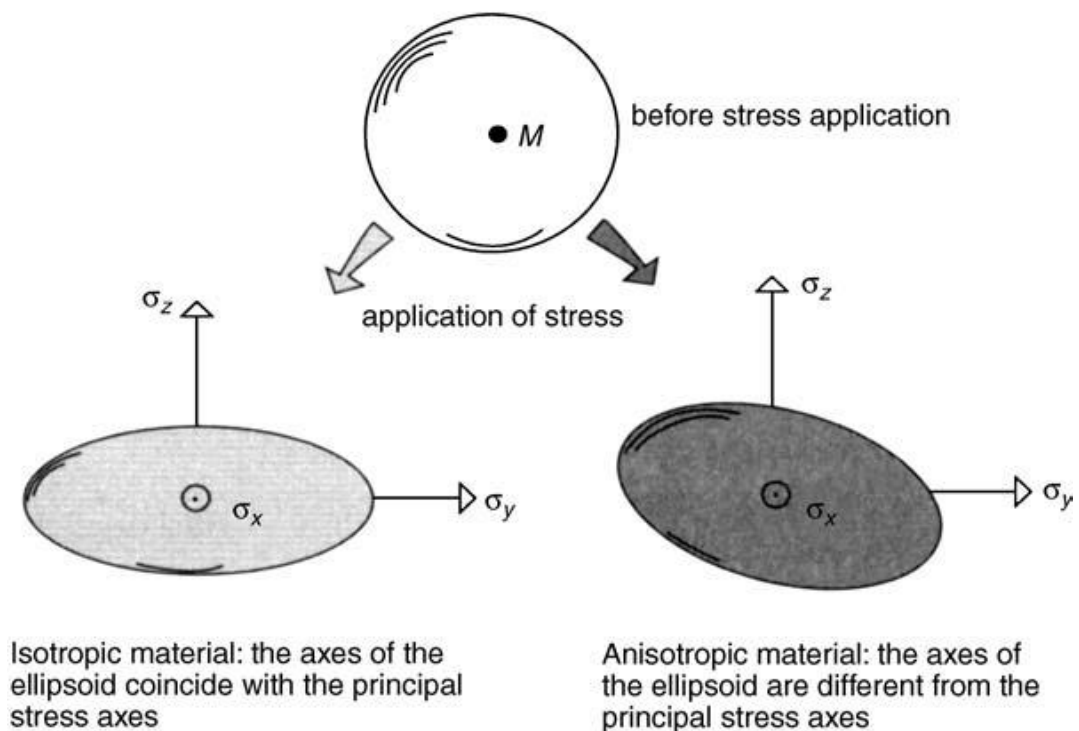


Figura 2.9, schema della deformazione.

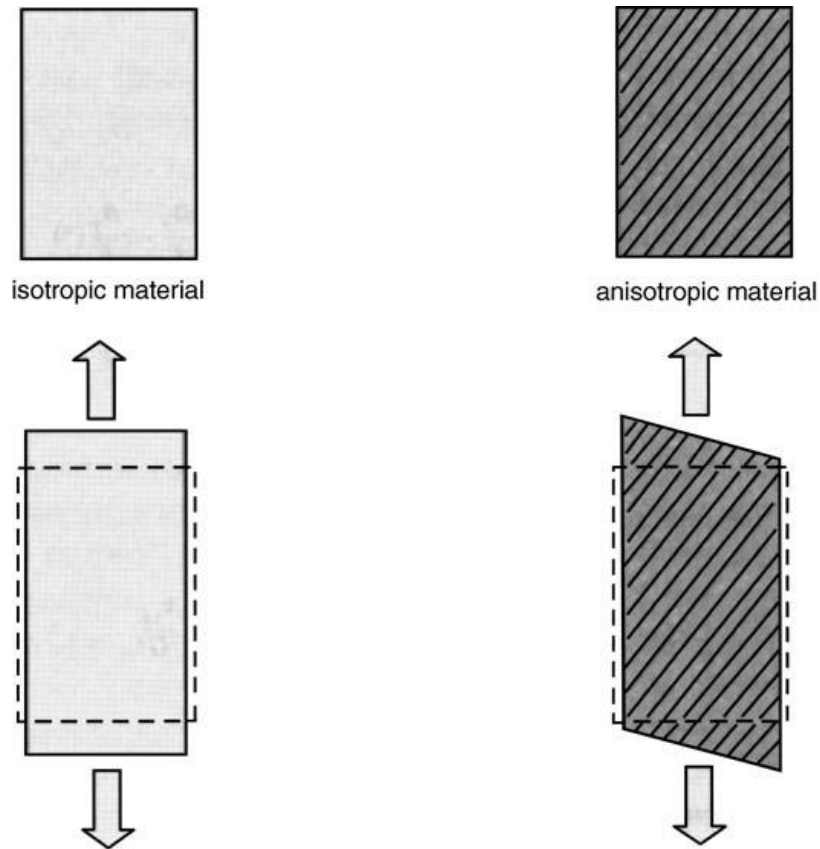


Figura 2.10, confronto tra la deformazione di un materiale isotropo e uno anisotropo.

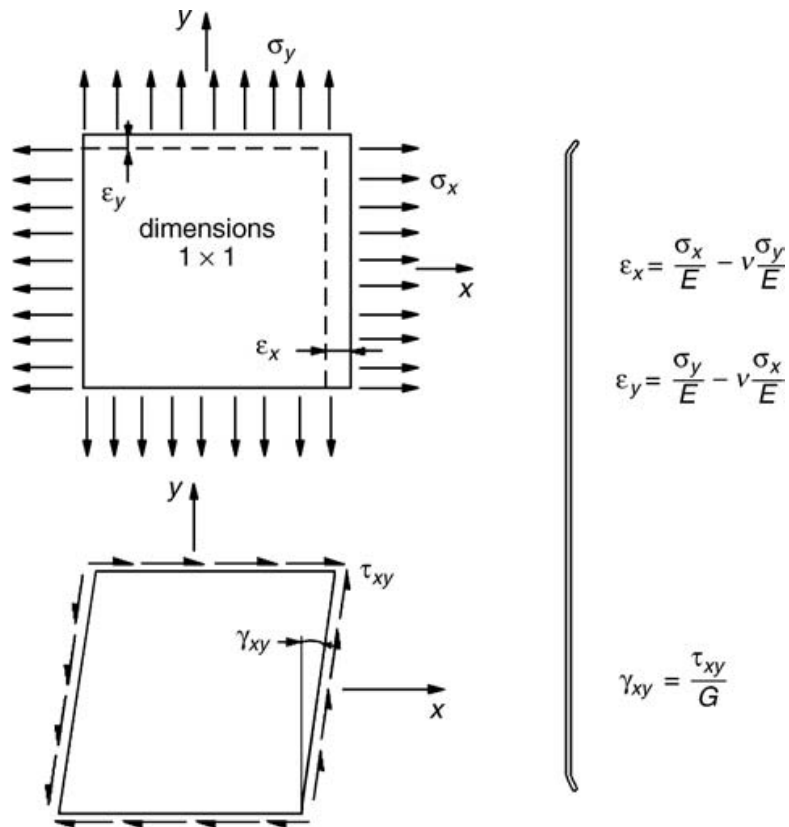


Figura 2.11, comportamento sforzo-deformazione di un materiale isotropo.

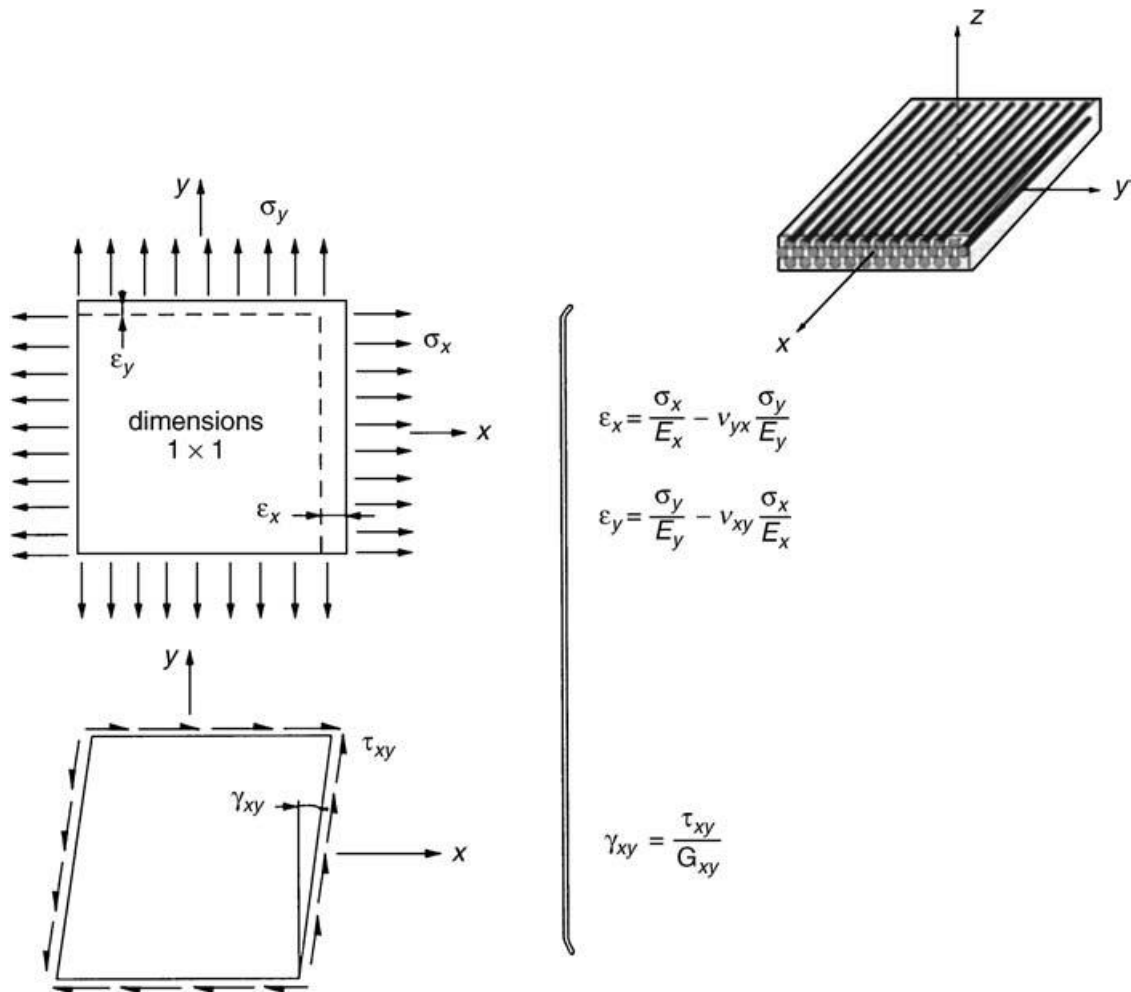
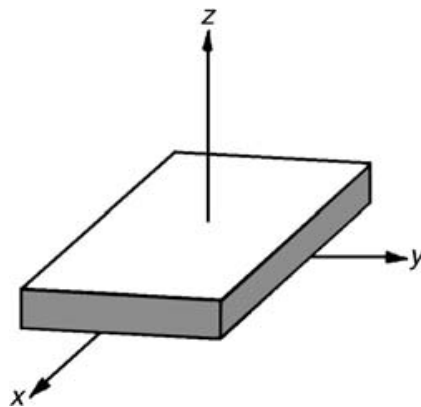


Figura 2.12, comportamento sforzo-deformazione in un materiale anisotropo. Notare che $\nu_{xy} \neq \nu_{yx}$.

2.4.2 Materiali isotropi

In condizioni di stato di tensione piano, le seguenti relazioni sono valide per un materiale elastico ed isotropo.



É possibile scrivere la relazione sforzo-deformazione (vedi Figura 2.11) in forma matriciale:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Il materiale è caratterizzato da tre costanti elastiche: E , ν , G . Dove:

- E rappresenta il modulo di elasticità longitudinale (o modulo di Young), definito a partire dalla legge di Hooke: $E = \sigma/\varepsilon$
- ν rappresenta il modulo di Poisson (indicato anche come coefficiente di Poisson, coefficiente di contrazione trasversale o rapporto di Poisson), è una caratteristica propria di ciascun materiale (dipendente dalla temperatura) che misura, in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale, il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente. È definito come: $\nu = -\frac{\varepsilon_{trasv}}{\varepsilon_{long}}$
- G rappresenta il modulo di elasticità tangenziale (o di scorrimento), dato da: $G = \frac{\tau}{\gamma}$

La relazione tra di esse è:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Un materiale isotropo ed elastico può essere caratterizzato da due costanti elastiche indipendenti: E e ν .

2.4.3 Materiali anisotropi

L'equazione matriciale per i materiali anisotropi è (vedi Figura 2.12):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

La matrice sforzo-deformazione qui sopra è anche in questo caso simmetrica, ma il numero di distinte costanti elastiche è cinque: due moduli di elasticità (E_x e E_y), due coefficienti di Poisson (ν_{yx} e ν_{xy}) e un modulo di scorrimento, G_{xy} .

Solo quattro costanti elastiche sono indipendenti: E_x , E_y , G_{xy} , e ν_{yx} (o ν_{xy}). La quinta costante elastica può essere ottenuta usando la relazione di simmetria:

$$\frac{E_x}{\nu_{xy}} = \frac{E_y}{\nu_{yx}}$$

2.5 Caratteristiche del binomio rinforzo-matrice

Per comprendere come calcolare le proprietà meccaniche di un materiale composito sono necessarie delle definizioni.

Indichiamo come strato (o lamina) il semi-prodotto “rinforzo + resina” in una forma quasi-bidimensionale. Questo può essere:

- Un nastro di fibra unidirezionale più la matrice.
- Un tessuto più la matrice.

Queste diverse configurazioni del binomio rinforzo-matrice verranno esaminate maggiormente più avanti.

2.5.1 Rapporto di massa

Definiamo il rapporto tra massa delle fibre e massa totale del composito:

$$M_f = \frac{\text{Massa fibre}}{\text{Massa totale}}$$

Di conseguenza, la massa della matrice è:

$$M_m = \frac{\text{Massa matrice}}{\text{Massa totale}}$$

con

$$M_m = 1 - M_f$$

2.5.2 Rapporto volumetrico

Definiamo il rapporto tra fibra e volume totale del composito:

$$V_f = \frac{\text{Volume fibre}}{\text{Volume totale}}$$

Di conseguenza, il rapporto volumetrico della matrice è:

$$V_m = \frac{\text{Volume matrice}}{\text{Volume totale}}$$

con

$$V_m = 1 - V_f$$

È possibile passare dalla frazione di massa alla frazione di volume e vice versa. Se ρ_f e ρ_m sono la massa specifica rispettivamente di fibra e matrice, abbiamo:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}$$

$$M_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m}$$

A seconda dei metodi di fabbricazione, i comuni rapporti volumetrici di fibra sono mostrati in Tabella 2.5.

Tabella 2.5, rapporti volumetrici di fibra per differenti processi produttivi.

Processo di formazione	Rapporto fibra-volume
Laminazione manuale	30%
Stampaggio per compressione	40%
Stampaggio sotto vuoto	50% – 80%
Filament Winding	60% – 85%

2.5.3 Spessore di lamina

Lo spessore h dello strato è definito come il rapporto tra la massa di fibra m_{of} in grammi per m^2 di area, ed è valutabile come:

$$h = \frac{m_{of}}{V_f \rho_f}$$

E' possibile anche esprimere lo spessore in termini di frazione di fibre-massa:

$$h = m_{of} \left[\frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1 - M_f}{M_f} \right) \right]$$

La Tabella 2.6 mostra alcuni esempi tipici di spessore.

Tabella 2.6

Fibra	M_f	h
Vetro E	34%	0,125 mm
Vetro R	68%	0,175 mm
Kevlar	65%	0,13 mm
Carbonio HS	68%	0,13 mm

2.6 Strati unidirezionali

Uno strato unidirezionale è definito come un composito in cui le fibre di rinforzo si sviluppano lungo una sola direzione principale (vedi Figura 2.13). Se sono presenti altre fibre (tipicamente trasversali alle prime) queste hanno il semplice compito di tenere unite le altre.

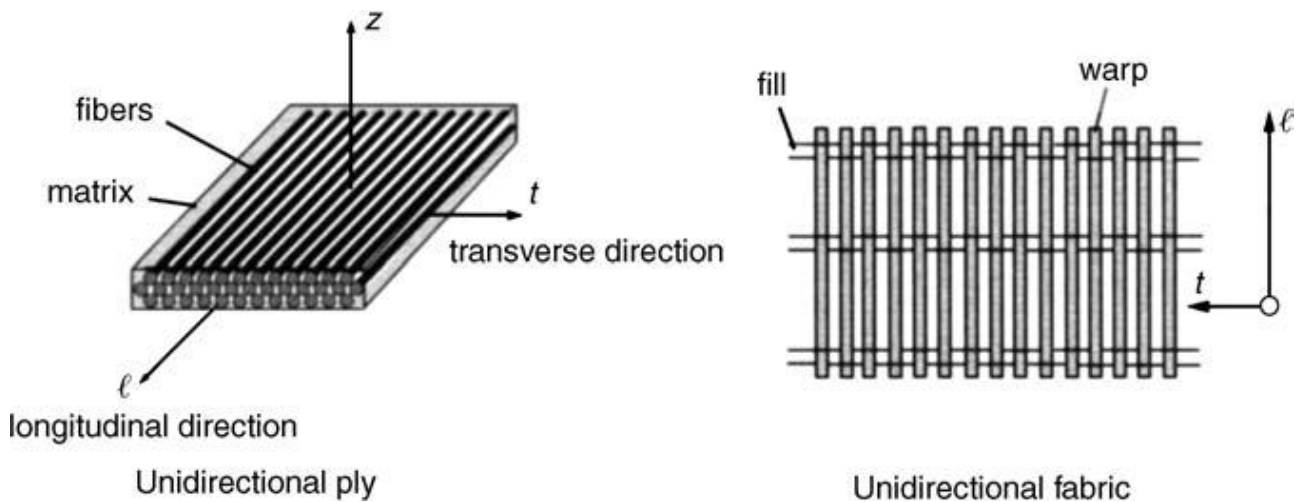
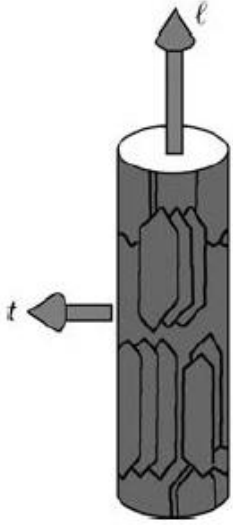


Figura 2.13, orientazione delle fibre negli strati unidirezionali.

2.6.1 Modulo elastico

Le caratteristiche meccaniche del binomio fibre-matrice possono essere ottenute basandosi sulle caratteristiche di ciascuno dei due costituenti. In letteratura, ci sono relazioni sia teoriche che semi-empiriche. In quanto tali, i risultati di queste relazioni non sempre corrispondono con i risultati sperimentali. Una delle ragioni per cui ciò avviene è perché le fibre stesse presentano un certo grado di anisotropia. In Tabella 2.7, si osservano valori bassi del modulo elastico nella direzione trasversale per Kevlar® e fibre di carbonio, mentre la fibra di vetro è isotropica.

Tabella 2.7, moduli elastici di diverse fibre.

	<i>Glass</i> <i>E</i>	<i>Kevlar</i>	<i>Carbon</i> <i>H.R.</i>	<i>Carbon</i> <i>H.M.</i>
 fiber longitudinal modulus in l direction E_{f_l} (MPa)	74,000	130,000	230,000	390,000
fiber transverse modulus in t direction E_{f_t} (MPa)	74,000	5400	15,000	6000
fiber shear modulus $G_{f_{lt}}$ (Mpa)	30,000	12,000	50,000	20,000
fiber Poisson ratio $\nu_{f_{lt}}$	0.25	0.4	0.3	0.35
	<i>Isotropic</i>	<div style="border-top: 1px solid black; width: 100%;"></div> <i>Anisotropic</i>		

Grazie alle definizioni fornite nei precedenti paragrafi, è possibile valutare le seguenti relazioni che caratterizzano uno strato unidirezionale:

- Il modulo d'elasticità nella direzione longitudinale delle fibre (E_l) è dato da:

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m$$

In pratica questo modulo dipende essenzialmente da E_f , poiché il modulo della matrice E_m è molto inferiore a E_f .

- Il modulo d'elasticità nella direzione trasversale all'asse delle fibre (E_t) è dato da:

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m V_f}{E_{ft}}} \right]$$

- Il modulo tangenziale G_{lt} è dato da:

$$G_{lt} = G_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m V_f}{G_{flt}}} \right]$$

- Il coefficiente di Poisson ν_{lt} , che rappresenta la contrazione nella direzione trasversale t quando una lamina è soggetta a un carico di tensione nella direzione longitudinale l (vedi Figura 2.14), è dato da:

$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$$

- Il modulo lungo una qualsiasi direzione piana l_t è dato dalla seguente espressione, dove $c = \cos\theta$ e $s = \sin\theta$ (Figura 2.14):

$$E_x = \frac{1}{\frac{c^4}{E_l} + \frac{s^4}{E_t} + 2c^2s^2 \left(\frac{1}{2G_{lt}} - \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)}$$

Notare come questo modulo decresce rapidamente discostandosi dalla direzione delle fibre, giungendo ad un minimo per $\theta = 90^\circ$.

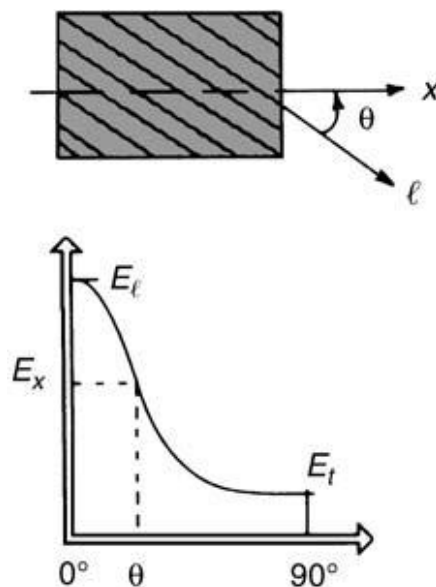


Figura 2.14, modulo non assiale.

2.6.2 Carico di rottura di una lamina unidirezionale

Le curve in Figura 2.15 mostrano l'importante differenza nel comportamento tra un materiale metallico classico e un composito a lamina unidirezionale. Queste differenze possono essere sintetizzate in alcuni punti:

- C'è una mancanza di deformazione plastica nel composito unidirezionale.
- Il composito unidirezionale ha un comportamento pressoché elastico (questo può essere sia un vantaggio o meno, dipende dall'applicazione).
- Il carico di rottura del composito unidirezionale è generalmente più alto (questo è un vantaggio).

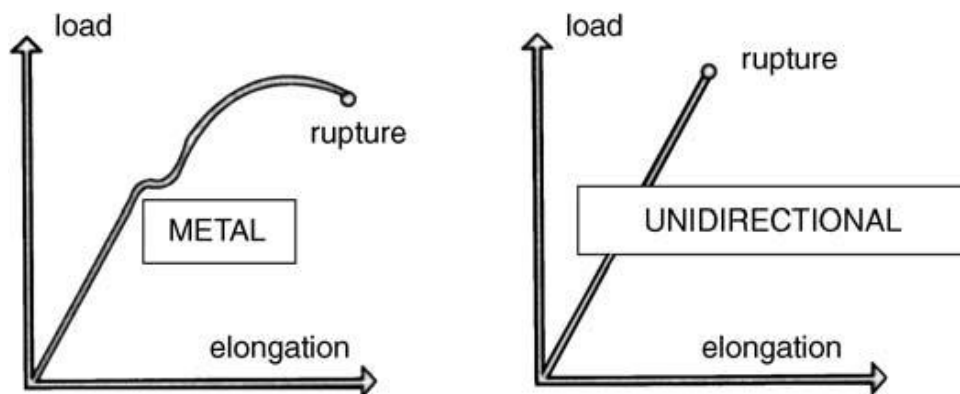


Figura 2.15, curve di carico per un materiale metallico ed uno composito unidirezionale.

Quando la fibra si rompe prima della matrice, lungo la direzione longitudinale delle fibre si ha l'espressione seguente (vedi Figura 2.16):

$$\sigma_{l \text{ rottura}} = \sigma_{f \text{ rottura}} \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right]$$

Dove $\sigma_{l \text{ rottura}}$ = resistenza alla frattura nella direzione delle fibre.

Approssimativamente vale: $\sigma_{l \text{ rottura}} \approx \sigma_{f \text{ rottura}} \times V_f$

Il carico di rottura lungo una direzione generica è dato dalla seguente espressione (vedi Figura 2.16), dove:

- $\sigma_{t \text{ rottura}}$ = resistenza alla frattura nella direzione trasversale delle fibre.
- $\tau_{lt \text{ rottura}}$ = resistenza al taglio nel piano dello strato.
- $c = \cos\theta$
- $s = \sin\theta$

$$\sigma_{x \text{ rottura}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^4}{\sigma_{t \text{ rottura}}^2} + \frac{s^4}{\sigma_{t \text{ rottura}}^2} + \left(\frac{1}{\tau_{lt \text{ rottura}}^2} - \frac{1}{\sigma_{t \text{ rottura}}^2}\right) c^2 s^2}}$$

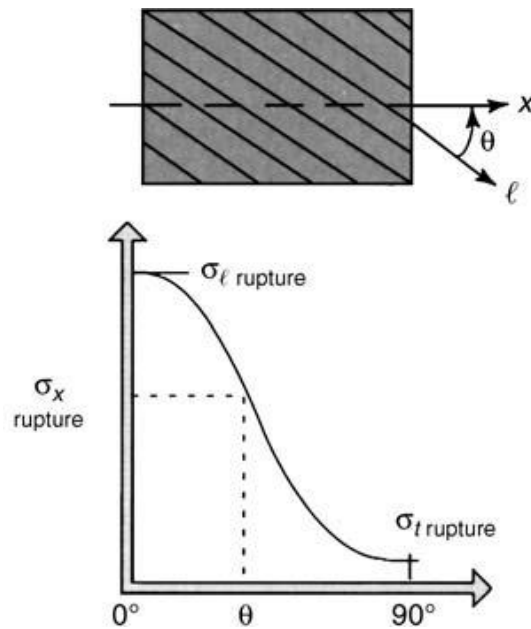
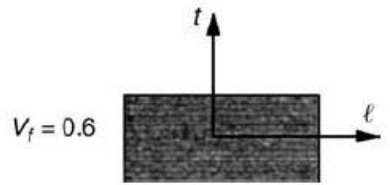


Figura 2.16, rottura non assiale.

2.6.3 Esempi

La Tabella 2.8 mostra le proprietà di alcuni strati unidirezionali di fibre diverse e resina epossidica, con un valore di V_f pari al 60%.

Tabella 2.8, proprietà degli strati unidirezionali fibre/resina epossidica.



	<i>Glass</i>	<i>Kevlar</i>	<i>Carbon</i>
Specific mass (kg/m ³)	2080	1350	1530
Longitudinal tensile fracture strength (MPa)	1250	1410	1270
Longitudinal compressive fracture strength (MPa)	600	280	1130
Transverse tensile fracture strength (MPa)	35	28	42
Transverse compressive fracture strength (MPa)	141	141	141
In plane shear strength (MPa)	63	45	63
Interlaminar shear strength (MPa)	80	60	90
Longitudinal elastic modulus E_l (MPa)	45,000	85,000	134,000
Transverse elastic modulus E_t (MPa)	12,000	5600	7000
Shear modulus G_{lt} (MPa)	4500	2100	4200
Poisson ratio ν_{lt}	0.3	0.34	0.25
Longitudinal coefficient of thermal expansion at 20°C α_l (°C ⁻¹)	$0.4 \text{ to } 0.7 \times 10^{-5}$	-0.4×10^{-5}	-0.12×10^{-5}
Transverse coefficient of thermal expansion at 20°C α_t (°C ⁻¹)	$1.6 \text{ to } 2 \times 10^{-5}$	5.8×10^{-5}	3.4×10^{-5}

In generale la resistenza a compressione lungo la direzione longitudinale è minore della resistenza a trazione nella medesima direzione per via di un fenomeno di micro instabilità delle fibre all'interno della matrice.

2.7 Tessuti

I tessuti sono fatti di fibre orientate lungo due direzioni perpendicolari: una è chiamata ordito (warp, si sviluppa longitudinalmente) e l'altra trama (weft, si sviluppa trasversalmente).

Le fibre sono tessute assieme, il che significa che i fili della trama passano sopra e sotto i fili dell'ordito, seguendo un motivo prestabilito. La Figura 2.17a mostra un tessuto normale piano in cui ogni filo della trama va prima sopra e poi sotto ogni filo dell'ordito e così via. In Figura 2.17b, ogni filo di trama va sopra a 4 fili di ordito prima di andare sotto al quinto. La Figura 2.17c mostra un tessuto twill.

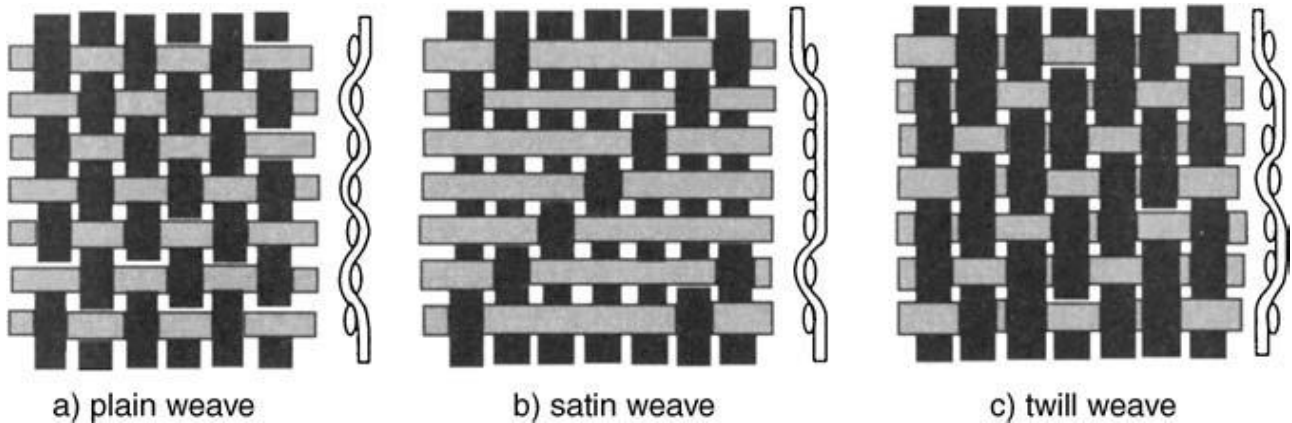


Figura 2.17, tessiture nei compositi.

I tessuti mostrati in Figura 2.17b e c si adattano meglio a forme complesse e la loro resistenza e rigidità sono leggermente più elevate degli altri, poiché il numero di intrecci è minore e le fibre sono più dritte.

Esistono anche forme di tessitura più complesse, con angolo di intersezione fra le fibre diverso da 90° .

Per quanto riguarda le proprietà elastiche di un tessuto, approssimativamente è possibile considerare quest'ultimo come formato da due strati unidirezionali sovrapposti a 90° l'uno con l'altro. Usiamo per tanto la seguente notazione:

e = spessore totale dello strato

n_1 = numero di fili d'ordito per metro

n_2 = numero di fili di trama per metro

$$k = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$$

V_f = rapporto volumetrico delle fibre

E' possibile quindi dedurre lo spessore dello strato unidirezionale equivalente (Figura 2.18) come:

$$e_{ordito} = k \times e$$

$$e_{trama} = (1 - k) \times e$$

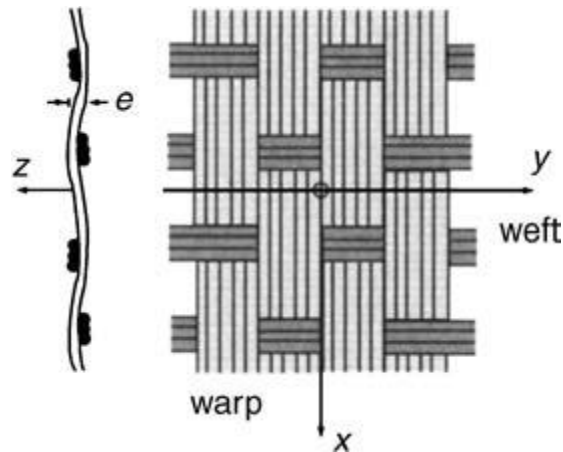


Figura 2.18, spessore totale del tessuto e notazione.

2.7.1 Modulo elastico di uno strato di tessuto

I due strati di fibre formanti il tessuto possono essere considerati:

- Separatamente, come mostrato nel paragrafo precedente. Le proprietà meccaniche E_l , E_t , G_{lt} , ν_{lt} possono essere determinate con le formule mostrate nel paragrafo 2.6.1.
- Assieme, lo strato di tessuto viene considerato come un singolo strato anisotropo con spessore e (x è la direzione lungo l'ordito e y è la direzione lunga la trama, vedi Figura 2.18). Si ottiene quindi:

$$E_x \approx k \times E_l + (1 - k) \times E_t$$

$$E_y \approx k \times E_t + (1 - k) \times E_l$$

$$G_{xy} = G_{lt}$$

$$\nu_{xy} \approx \frac{\nu_{lt}}{\left[k + (1 - k) \frac{E_l}{E_t} \right]}$$

La rigidezza ottenuta con un tessuto è minore di quella che si osserva sovrapponendo due strati unidirezionali (vedi Figura 2.19). Ciò è dovuto al fatto che le fibre vengono curvate durante il processo di tessitura. Questa curvatura rende il composito tessuto più deformabile di uno formato da due strati sovrapposti soggetti allo stesso carico. Esistono difatti tessuti che sono definiti ad "alto modulo", dove gli strati unidirezionali non sono collegati con l'altro mediante tessitura, ma bensì gli strati unidirezionali sono tenuti insieme da cuciture sottili di fili di vetro o polimero.

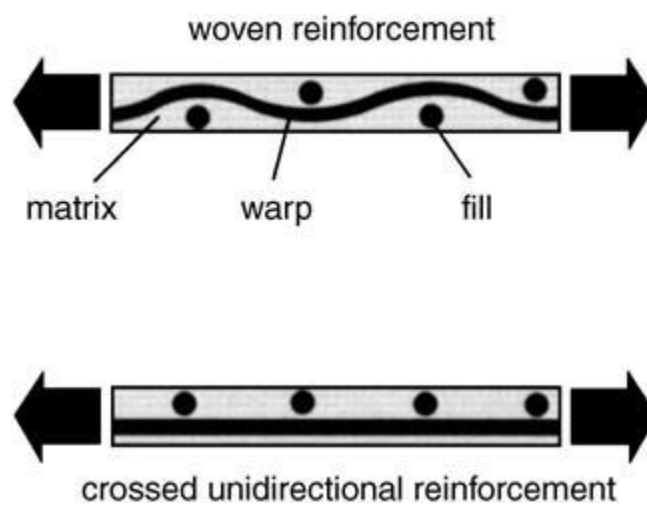
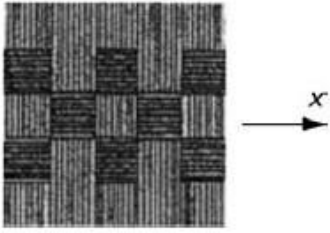


Figura 2.19, fibre tessute e fibre unidirezionali sovrapposte.

2.7.2 Esempi

Un tessuto si dice equilibrato quando il numero di fili lungo le direzioni di ordito e trama è uguale. Il materiale è quindi identico lungo le due direzioni. In Tabella 2.9 sono riportate le proprietà di un materiale composito realizzato con tessuti equilibrati di diverse fibre e resina epossidica.

Tabella 2.9. proprietà di un tessuto equilibrato e resina epossidica.



	<i>E Glass</i>	<i>Kevlar</i>	<i>Carbon</i>
Fiber volume fraction V_f (%)	50	50	45
Specific mass (kg/m^3)	1900	1330	1450
Tensile fracture strength along x or y (MPa)	400	500	420
Compressive fracture strength along x or y (MPa)	390	170	360
In plane shear strength (MPa)		150	55
Elastic modulus $E_x (= E_y)$ (MPa)	20,000	22,000	54,000
Shear modulus G_{xy} (MPa)	2850		4000
Poisson coefficient ν_{xy}	0.13		0.045
Coefficient of thermal expansion $\alpha_x = \alpha_y$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)		-0.2×10^{-5}	0.05×10^{-5}
Maximum elongation (%)		2.1	1.0
Price (relative)	1	4.2	7.3

2.8 Possibili utilizzi

Il range delle applicazioni per i materiali compositi a matrice polimerica che utilizzano tra le altre, come rinforzo, fibre carbonio, Kevlar® e vetro è molto ampio. Alcuni esempi sono elencati di seguito:

- Automotive:
 - ✓ Componenti di carrozzeria e interni
 - ✓ Telaio
 - ✓ Cerchioni
 - ✓ Molle per sospensioni
 - ✓ Braccetti sospensioni
 - ✓ Alberi di trasmissione
 - ✓ Serbatoi
 - ✓ Gusci per sedili e celle di sicurezza

- Trasporto aereo:
 - ✓ Aerei passeggeri
 - ✓ Velivoli militari
 - ✓ Alianti
 - ✓ Componenti di aeromobili: radomes, bordi d'attacco, alettoni, stabilizzatori verticali
 - ✓ Rotori per elicotteri
 - ✓ Alberi di trasmissione
- Trasporti spaziali:
 - ✓ Serbatoi
 - ✓ Porte cargo
 - ✓ Pannelli e infrastrutture interne
- Trasporto su rotaia:
 - ✓ Frontale di locomotori
 - ✓ Vagoni
 - ✓ Porte, sedili, pannelli interni
 - ✓ Griglie di ventilazione
- Trasporto marittimo:
 - ✓ Hovercrafts
 - ✓ Imbarcazioni di salvataggio e pattuglia
 - ✓ Pescherecci
 - ✓ Mezzi da sbarco
 - ✓ Navi anti-mine
 - ✓ Barche da competizione
 - ✓ Canoe
- Trasporto su cavo:
 - ✓ Cabine teleferiche
 - ✓ Telecabine
- Applicazioni meccaniche generiche:
 - ✓ Carter e protezioni
 - ✓ Bracci robotici
 - ✓ Volani
 - ✓ Tubi
 - ✓ Bombole per gas compressi

- ✓ Componenti pneumatici
- Elettrotecnica, Elettronica:
 - ✓ Isolamento per componenti elettronici
 - ✓ Supporti per circuiti stampati
 - ✓ Coperture
 - ✓ Antenne, radomes
 - ✓ Guide per cavi
- Sports:
 - ✓ Racchette da tennis
 - ✓ Canne da pesca
 - ✓ Sci
 - ✓ Vele e aquiloni
 - ✓ Tavole da surf
 - ✓ Roller skates
 - ✓ Archi e frecce
 - ✓ Giavellotti
 - ✓ Caschi
 - ✓ Protezioni per articolazioni
 - ✓ Telai e cerchi per biciclette
 - ✓ Mazze da golf
 - ✓ Remi

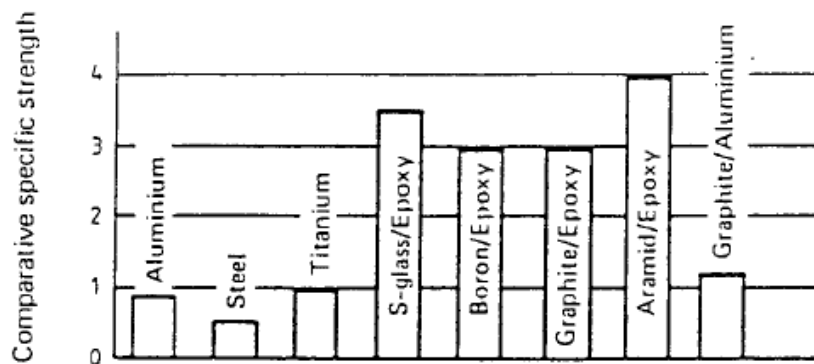
2.9 Vantaggi e svantaggi dell'impiego di compositi

Lo sviluppo delle applicazioni di questa classe di materiali è dovuta agli innumerevoli vantaggi:

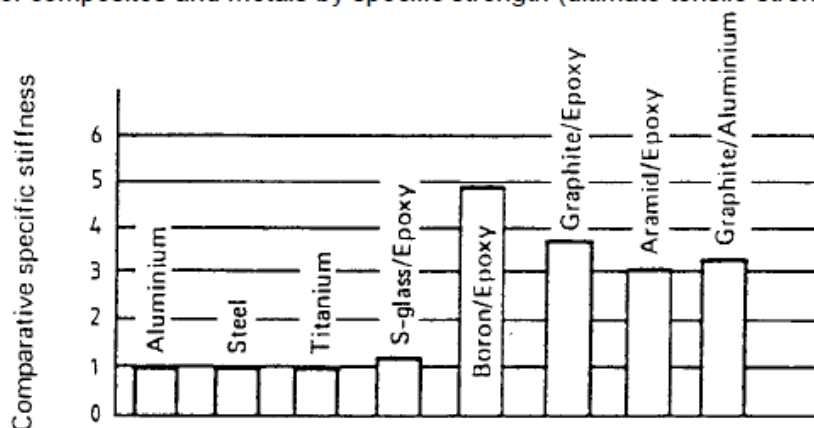
- Hanno elevato limite elastico, che corrisponde spesso al loro limite di rottura.
- Sono molto resistenti a fatica.
- Presentano un peso ridotto.
- Hanno un coefficiente di dilatazione lineare molto basso (o addirittura negativo).

- Non danno luogo a fenomeni di corrosione, eccetto che per il caso in cui dell'alluminio sia posto in contatto con fibre di carbonio poiché si hanno fenomeni di corrosione galvanica nel metallo.
- Non sono sensibili ai comuni composti chimici usati nei motori: grassi, olii, fluidi idraulici, vernici e solventi. Tuttavia, i diluenti usati per le vernici possono intaccare la struttura della resina.
- Hanno un'ottima resistenza a combustione comparata a quella delle leghe leggere di spessore analogo. Tuttavia, I fumi prodotti dalla combustione di certe matrici(fenoliche) possono essere tossici.
- Possibilità di una maggior integrazione delle strutture, con conseguente riduzione del numero di componenti.

I vantaggi che si possono ottenere rispetto ai materiali convenzionali sono comunque sempre considerevoli, come mostrato in Figura 2.20.



A comparison of composites and metals by specific strength (ultimate tensile strength/density)



A comparison of composites and metals by specific stiffness (modulus/density)

Figura 2.20, vantaggi nell'impiego di compositi rispetto a materiali metallici tradizionali.

Gli svantaggi sono invece principalmente:

- La resistenza a compressione in genere è più bassa rispetto ai metalli.
- Hanno una resistenza ad impatto medio-bassa (in ogni caso inferiore a quella dei metalli).
- Invecchiano se esposti ai raggi UV, a calore e ad umidità (la resina epossidica può assorbire acqua per diffusione fino al 6% della propria massa; il composito fibra/resina ne può assorbire fino al 2%). Inoltre l'umidità può anche comprometterne la stabilità dimensionale.
- Soffrono di possibile attacco da parte di batteri, essendo composti organici.
- Elevato danneggiamento locale in caso in cui la struttura sia colpita da un fulmine, in quanto la resina è un ottimo isolante.
- Maggiori difficoltà nelle riparazioni.
- Costi elevati (tuttavia è solo il costo dei materiali compositi ad essere elevato rispetto a quello dei metalli, ma non per questo il costo finale della struttura deve essere più elevato).

2.10 Problematiche legate all'impiego dei compositi

I materiali compositi sono in continua evoluzione e sono materiali relativamente giovani. Questo comporta che spesso la conoscenza delle proprietà (nonché la loro evoluzione nel tempo) sia limitata, così come la disponibilità di database completi, con conseguenti limitazioni in fase progettuale.

I rapporti e le relazioni mostrate nei paragrafi precedenti per il calcolo dei moduli e del coefficiente di Poisson dei materiali compositi, permettono di ottenere soltanto un ordine di grandezza di queste proprietà meccaniche. Alcune di queste relazioni non sono abbastanza accurate. Inoltre, queste proprietà sono molto sensibili alle condizioni di fabbricazione.

E' necessario per il progettista avere una buona conoscenza del comportamento e delle proprietà di questi materiali, tuttavia, i dati

relativi alle caratteristiche meccaniche non sono sempre disponibili. E' quindi evidente la necessità di ottenere tali dati tramite test in laboratorio, molti dei quali sono stati standardizzati per quanto riguarda prove di trazione, di flessione e di impatto.

Un'approfondita analisi delle norme è oggetto del capitolo successivo. Ogni attività sperimentale deve essere riproducibile con accuratezza al fine di ottenere dati coerenti al variare delle tipologie di materiali in esame.

Per tale motivo sono stati creati degli standard di prova, in particolare dall'American Society for Testing and Materials (ASTM).

3 Normative

Prendendo in esame il caso della trazione, oggetto di questa tesi, sono state individuate le norme ASTM D 3039/D 3039M e ASTM D 3518/D 3518M.

3.1 ASTM D 3039/D 3039M – 08 e suoi scopi

La prima normativa presa in esame è la ASTM D 3039/D 3039M – 08. La prova viene eseguita su un campione analogo a quello rappresentato in Figura 3.1, strumentato con estensometro elettrico e strain gage, consentendo la misurazione della resistenza e della deformazione a rottura, del modulo di Young e del coefficiente di Poisson.

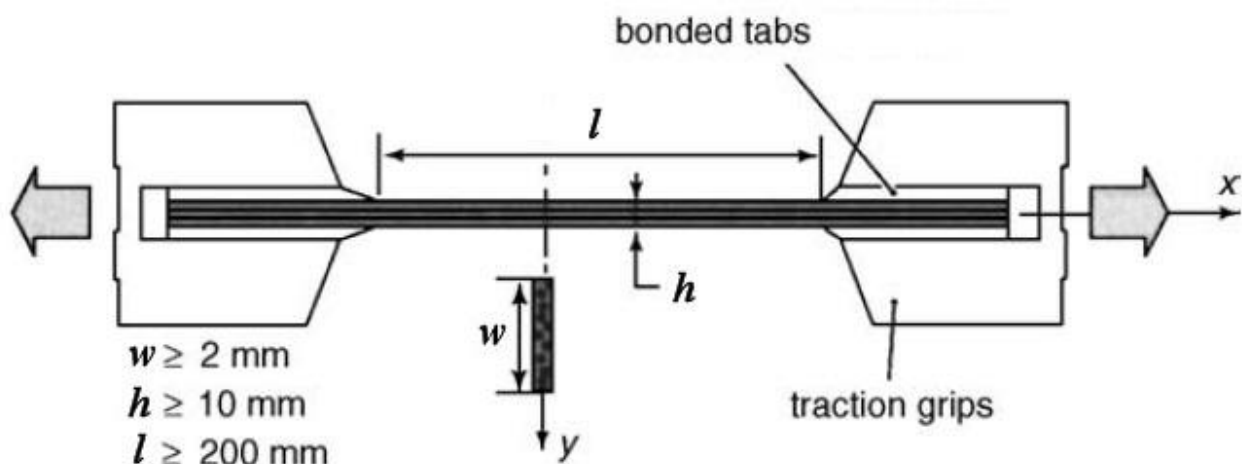


Figura 3.1, campione standard per prova di trazione secondo la norma ASTM D 3039/D 3039M.

Questo metodo di prova determina le proprietà di trazione piana di un materiale composito a matrice polimerica rinforzato con fibre ad alto modulo. I materiali compositi che è possibile analizzare devono essere caratterizzati da fibre continue o discontinue, con il laminato equilibrato e simmetrico rispetto alla direzione di prova.

La normativa utilizza sia il Sistema Internazionale (SI) che quello anglosassone in pollici-libbra. I valori indicati in ciascun sistema non sono esattamente equivalenti, pertanto, ciascun sistema deve essere utilizzato indipendentemente dall'altro, in quanto combinare i valori dei due sistemi può portare a risultati non conformi.

Questa norma non è tesa ad affrontare tutte le problematiche relative alla sicurezza, eventualmente, associata al suo uso. È responsabilità dell'utilizzatore di questo standard stabilire le appropriate misure relative alla sicurezza e alla salute, determinando l'applicabilità dei limiti normativi prima dell'uso.

3.1.1 Terminologia

Riportiamo di seguito la definizione dei simboli utilizzati nella norma:

- A , area minima della sezione trasversale di un provino.
- CV , coefficiente di variazione statistica di un campione di popolazione per una determinata proprietà (in percentuale).
- E , modulo di elasticità nella direzione di prova.
- F^{tu} , carico di rottura nella direzione di prova.
- h , spessore del provino.
- L_g , lunghezza dell'estensometro.
- L_{min} , lunghezza d'incollaggio minima richiesta per il tab.
- n , numero di provini per la popolazione campione.
- P , carico sopportato dal provino in prova.
- P^f , carico a rottura sopportato dal provino in prova.
- P^{max} , massimo carico sopportato prima della rottura dal provino in prova.
- s_{n-1} , deviazione standard statistica di una popolazione campione per una data proprietà.
- w , larghezza del provino.
- x_i , risultato del test per un singolo provino di una popolazione campione per una data proprietà.
- \bar{x} , media di una popolazione campione per una determinata proprietà.
- δ , spostamento estensionale.
- ε , simbolo generale per la deformazione, sia essa longitudinale o trasversale.
- σ , sollecitazione normale.
- ν , coefficiente di Poisson.

3.1.2 Sintesi del metodo di prova

Un provino, realizzato tagliando una sottile striscia di materiale avente sezione trasversale rettangolare costante, è montato tra gli afferraggi di un'apparecchiatura per test meccanici e caricato monoassialmente, mentre si registrano la forza applicata e le deformazioni. La tensione di rottura del materiale può essere determinata a partire dalla forza massima registrata in corrispondenza della rottura del campione. Se la prova è monitorata montando sul campione un estensimetro bidirezionale od uno strain gage (sensore per la misura di deformazioni statiche e dinamiche che si applica alla superficie di corpi sottoposti a carico, maggiori dettagli verranno forniti nel Capitolo 4), si può determinare la risposta sforzo-deformazione a trazione, da cui si ricavano a loro volta la deformazione a rottura, il modulo di elasticità e il coefficiente di Poisson.

3.1.3 Significato ed uso

Questo metodo di prova è progettato per ottenere dati relativi alle proprietà di trazione del materiale composito. I fattori che influenzano la risposta a trazione e che, pertanto, è utile riportare, sono i seguenti:

- Materiale.
- Metodi di preparazione del materiale e lay-up.
- Sequenza di laminazione del campione.
- Il contenuto di vuoti.
- La percentuale di rinforzo sul volume totale.
- La preparazione del provino.
- Le condizioni del provino.
- L'ambiente di test.
- L'allineamento e il fissaggio del provino.
- La velocità di test.
- L'andamento della temperatura durante la prova.

Le proprietà che possono essere ottenute da questo metodo di prova sono le seguenti:

- Resistenza a trazione.
- Carico di rottura.
- Modulo di elasticità.
- Coefficiente di Poisson.

3.1.4 Apparato

Una fase molto importante della prova è la determinazione delle dimensioni del provino. Si utilizzano una riga graduata per misurarne la lunghezza, un calibro centesimale per la larghezza e un micrometro Palmer per lo spessore. La precisione degli strumenti deve essere idonea per la lettura entro $\pm 1\%$ della larghezza e spessore del provino.

La macchina di prova (vedi Figura 3.2) deve soddisfare i seguenti requisiti:

- Una testa stazionaria e una testa mobile.
- Il meccanismo di azionamento deve essere in grado di impartire alla testa mobile una velocità di spostamento controllata rispetto alla testa fissa.
- Deve essere presente un indicatore della forza totale applicata sul provino: questo dispositivo deve essere esente da ritardi inerziali e deve indicare la forza nell'intervallo d'interesse con una precisione del $\pm 1\%$ rispetto al valore indicato.
- Ogni testa della macchina di prova deve possedere un sistema di afferraggio per trattenere il provino in modo che la direzione di carico coincida con l'asse longitudinale del provino. Gli afferraggi devono applicare sufficiente pressione laterale da prevenire lo slittamento tra la superficie di presa e il provino. Se il provino è munito di tab, ovvero di zone riportate sul provino e destinate a migliorare la presa degli afferraggi, questi devono eccedere la lunghezza del tab stesso di 10-15mm. E' altamente consigliato l'impiego di afferraggi con dispositivo di rotazione

autoallineante per minimizzare le sollecitazioni flessionali sul provino.



Figura 3.2, foto della macchina e della postazione di controllo utilizzata durante le prove.

Se sono necessari dati sforzo-deformazione, questi devono essere determinati mediante un trasduttore di sforzo o strain gage. Bisogna porre attenzione nell'attaccare il dispositivo indicatore al provino senza danneggiare la superficie del campione. Se deve essere determinato il coefficiente di Poisson, il provino deve essere dotato di strumenti per misurare la deformazione in entrambe le direzioni longitudinali e laterali. Se deve essere determinato il modulo di elasticità, la tensione longitudinale deve essere misurata

simultaneamente su facce opposte del campione per consentire una correzione a seguito di una eventuale flessione del campione.

3.1.5 Specifiche e numero dei provini

I test vanno eseguiti su un numero di almeno 5 provini, onde evitare di ottenere risultati meno validi derivanti dall'uso di un minor numero di campioni.

La geometria dei provini, in particolare quelli che presentano i tab terminali, rimane in larga misura un'arte piuttosto che una scienza, mancando il consenso dell'industria su come affrontare la progettazione dell'interfaccia di presa. Ogni laboratorio che esegue test sui compositi ha sviluppato metodi di afferraggio specifici per i materiali e le condizioni che più comunemente esamina. Questi metodi si differenziano notevolmente l'uno dall'altro, rendendo estremamente difficile raccomandare un approccio universalmente utile.

Tuttavia, nonostante queste difficoltà, le linee guida per quanto riguarda le misure geometriche dei provini sono riportate nelle seguenti Tabelle 3.1 e 3.2 e Figura 3.3.

Tabella 3.1, requisiti geometrici del provino. A, vedi Tabella 3.2.

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Tabella 3.2, raccomandazioni geometriche del provino.

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

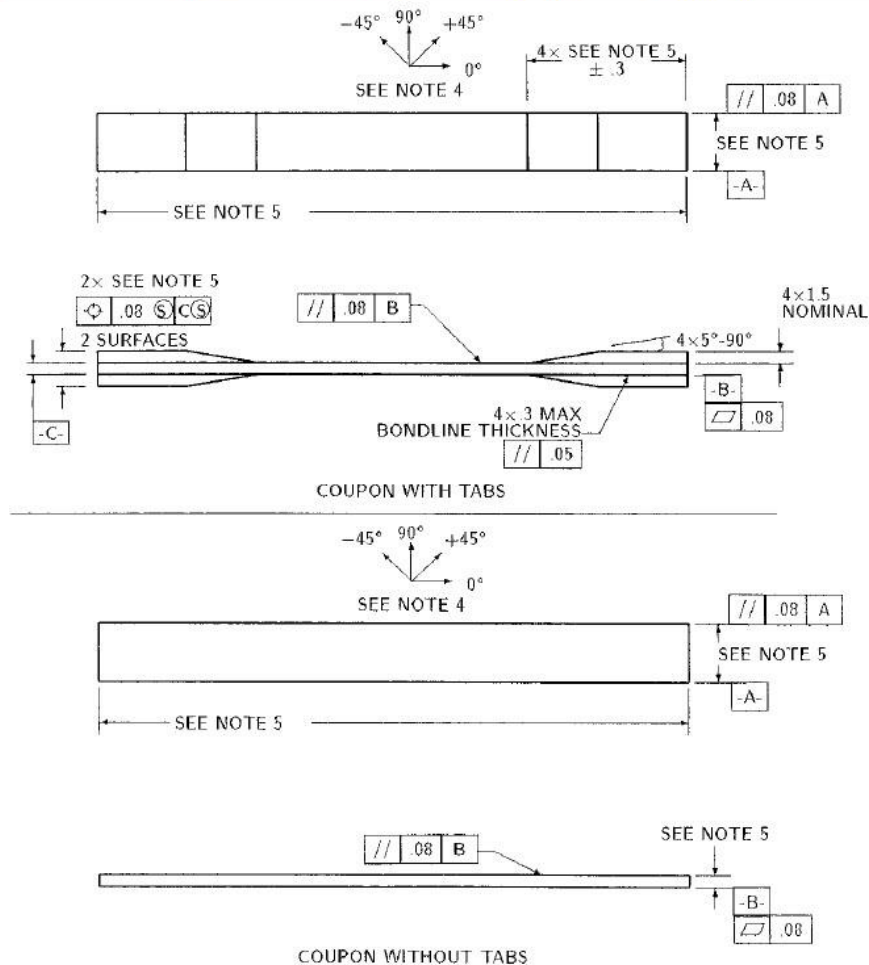


Figura 3.3, disegni del provino.

3.1.6 Procedura e parametri di prova

La velocità di prova deve essere scelta in modo che risulti una velocità di deformazione quasi costante nella sezione del gage. Inoltre la velocità di deformazione deve essere scelta in modo tale da produrre la rottura del provino entro 1-10 minuti. Le velocità standard consigliate sono:

- Per prove in controllo di deformazione, una velocità di deformazione di $0,01 \text{ min}^{-1}$.
- Per prove in controllo di spostamento, una velocità della traversa di 2 mm/min .

Per quanto riguarda la frequenza di registrazione dei dati della prova, è possibile registrare sia in maniera continua o a intervalli regolari e frequenti. Per questo metodo di prova sono raccomandati una frequenza di campionamento da 2 a 3 dati al secondo ed un minimo di 100 dati per ogni prova.

La procedura di prova prevede i seguenti passi:

- Collegare tramite incollaggio (vedi Capito 4) lo strain gage al provino nella mezzaria dello stesso.
- Collegare tramite stagnatura la strumentazione di registrazione per i trasduttori sul provino.
- Posizionare il campione tra gli afferraggi della macchina di prova, avendo cura di allineare l'asse longitudinale del campione con la direzione di prova.
- Serrare gli afferraggi, registrando la pressione applicata.
- Posizionare e ancorare sul fianco del provino l'estensometro collegato alla strumentazione di registrazione (vedi Figura 3.4).
- Annotare il metodo utilizzato per determinare la rottura iniziale (visivo, emissione acustica, ecc) registrando la forza massima, la forza di rottura e la deformazione, il più vicino possibile al momento della rottura.
- Annotare la posizione e le modalità con cui avviene la rottura, scegliendo, se possibile, una descrizione il più standard possibile utilizzando i codici riportati in Figura 3.5.

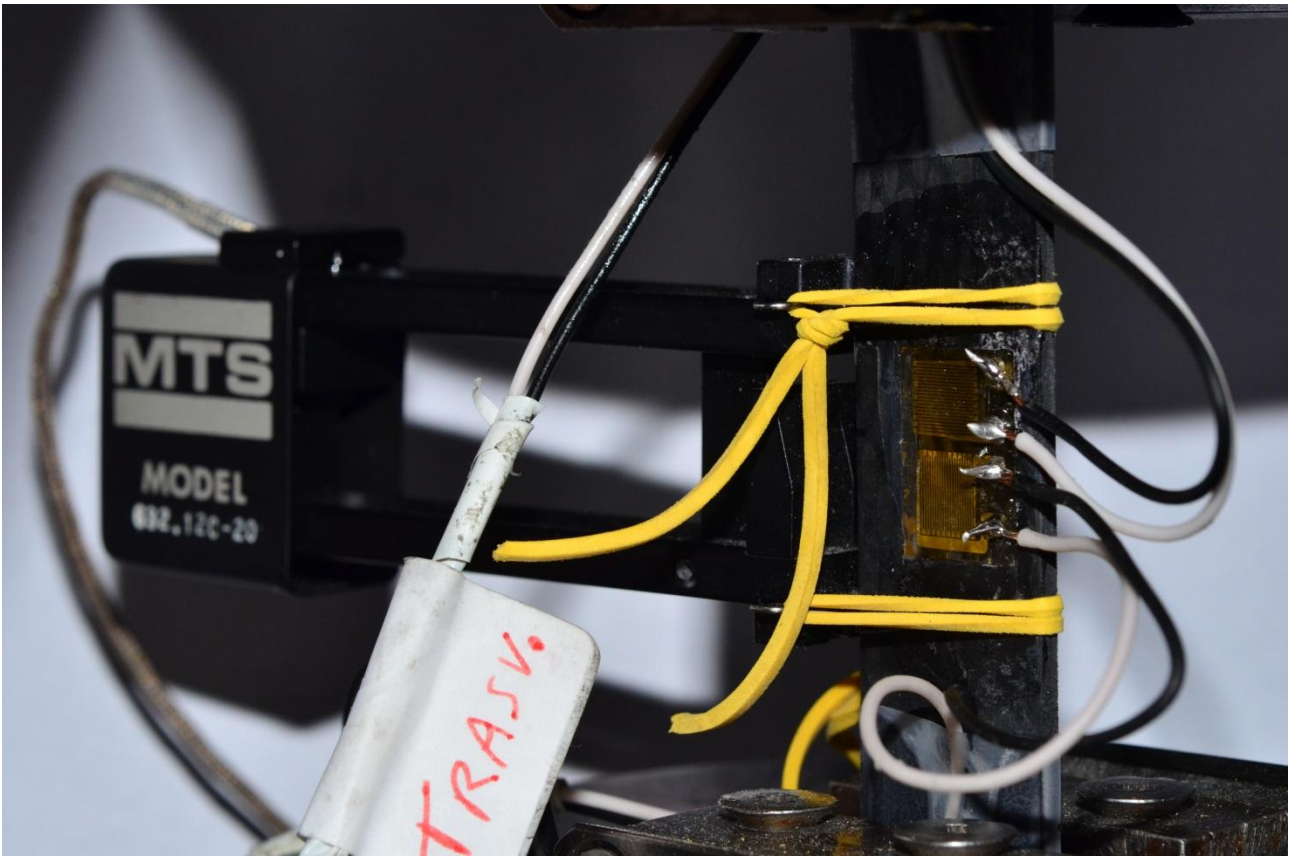
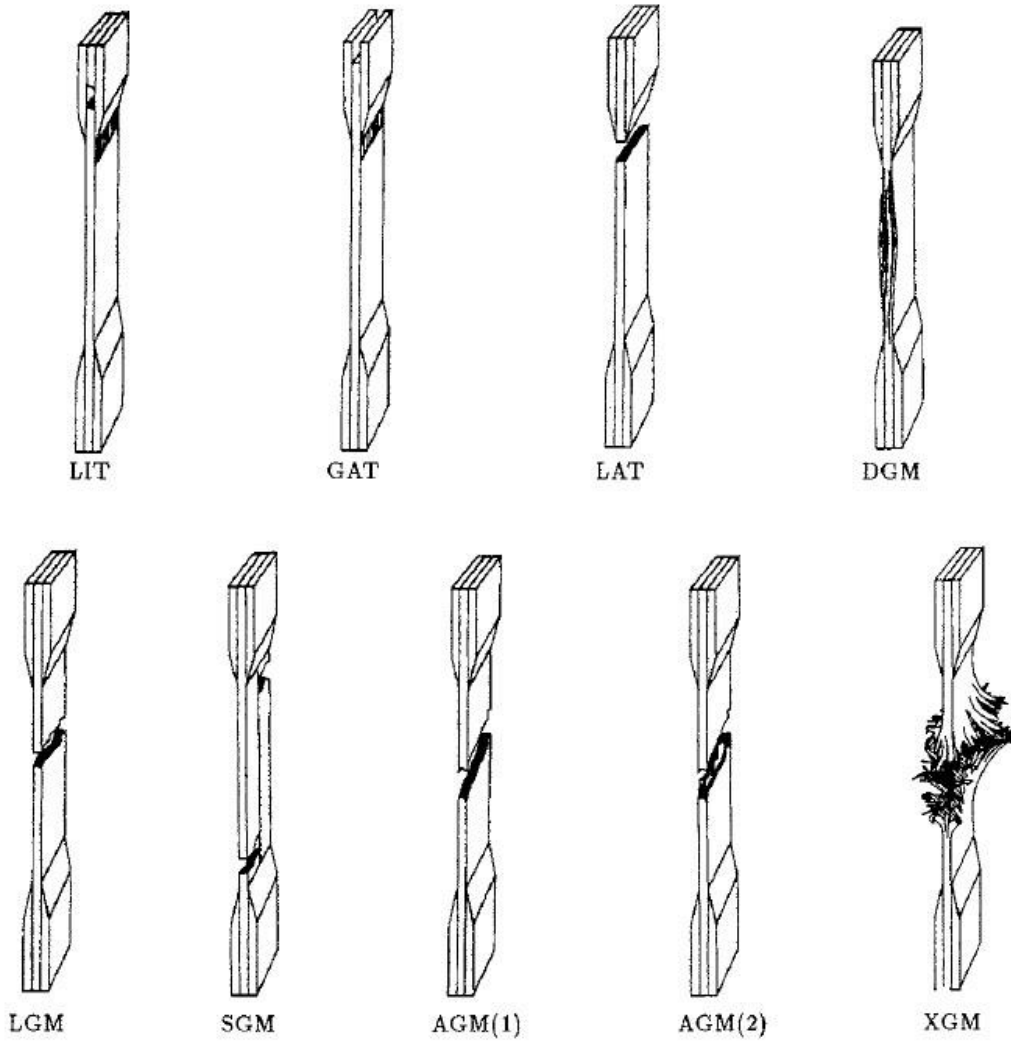


Figura 3.4, estensometro MTS® e strain gage montati sul provino e collegati alla strumentazione di registrazione.



First Character	
Failure Type	Code
Angled	A
edge Delamination	D
Grip/tab	G
Lateral	L
Multi-mode	M(xyz)
long. Splitting	S
eXplosive	X
Other	O

Second Character	
Failure Area	Code
Inside grip/tab	I
At grip/tab	A
<1W from grip/tab	W
Gage	G
Multiple areas	M
Various	V
Unknown	U

Third Character	
Failure Location	Code
Bottom	B
Top	T
Left	L
Right	R
Middle	M
Various	V
Unknown	U

Figura 3.5, codici standard da utilizzare per descrivere la rottura del provino.

3.1.7 Elaborazione dei dati sperimentali

La fase di analisi dei dati parte dal calcolo del carico di rottura con l'Eq 1 (i risultati vanno riportati usando tre cifre significative). Per quanto riguarda la resistenza a trazione, la sollecitazione di trazione in ciascun punto richiesto può essere determinata usando l'Eq 2.

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad (1)$$

$$\sigma_i = P_i / A \quad (2)$$

Dove:

- F^{tu} = carico di rottura in MPa.
- P^{max} = forza massima prima della rottura in N.
- σ_i = carico di trazione nel punto i-esimo in MPa.
- P_i = forza nel punto i-esimo in N.
- A = area della sezione trasversale in mm^2 .

Se la risposta del materiale è stata registrata con un estensometro, deve essere determinata la deformazione di trazione dall'indicazione di spostamento in ogni punto desiderato utilizzando l'Eq 3 (riportando i risultati con tre cifre significative).

$$\varepsilon_i = \delta_i / L_g \quad (3)$$

Dove:

- ε_i = deformazione di trazione nel punto i-esimo.
- δ_i = spostamento dell'estensometro nel punto i-esimo in mm.
- L_g = base di misurazione dell'estensometro in mm.

Per quanto riguarda il modulo elastico, si utilizza l'Eq 4; il range di deformazione su cui effettuare il calcolo è generalmente preso tra 1000 e 3000 $\mu\varepsilon$. Il risultato deve essere riportato usando 3 cifre significative assieme al range di deformazione scelto per il calcolo:

$$E^{chord} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \quad (4)$$

Dove:

- E^{chord} = modulo elastico in GPa.
- $\Delta\sigma$ = differenza di tensione tra due punti in MPa.
- $\Delta\varepsilon$ = differenza di deformazione tra due punti.

Nel caso il range di deformazione usato per il calcolo presenti una regione di transizione con andamento bilineare è consigliato utilizzare un range diverso in cui l'andamento sia lineare.

Per il calcolo del coefficiente di Poisson, si può determinare (graficamente o altro) la deformazione trasversale (misurata perpendicolarmente alla forza applicata), ε_t , e la deformazione longitudinale (misurata parallelamente alla forza applicata), ε_l . Il coefficiente di Poisson si valuta tramite l'Eq 5 con tre cifre significative. Deve essere riportato anche l'intervallo di deformazione utilizzato.

$$\nu = -\Delta\varepsilon_t / \Delta\varepsilon_l \quad (5)$$

Dove:

- ν = coefficiente di Poisson.
- $\Delta\varepsilon_t$ = differenza di deformazione trasversale tra due punti.
- $\Delta\varepsilon_l$ = differenza di deformazione longitudinale tra due punti.

Per ogni materiale, viene calcolato il valore medio, la deviazione standard e il coefficiente di variazione (percentuale) per ogni proprietà determinata, usando rispettivamente le Eq 6, 7 e 8.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (6)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$CV = 100 \times \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (8)$$

Dove:

- \bar{x} = valore medio della proprietà.
- s_{n-1} = deviazione standard.
- CV = coefficiente di variazione percentuale.
- n = numero di campioni.
- x_i = proprietà misurata.

3.2 ASTM D 3518/D 3518M – 94 e suoi scopi

La seconda normativa presa in esame è la ASTM D 3518/D 3518M. Questo metodo di test determina la risposta al taglio nel piano di materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre ad alto modulo.

I possibili compositi che è possibile analizzare devono essere caratterizzati da fibre continue disposte a $\pm 45^\circ$, con provini in grado di essere caricati e provati nella direzione x del laminato.

La normativa esamina valori indicati sia in unità SI che in pollici-libbra che, però, devono essere considerati separatamente. I valori indicati in ciascun sistema non sono esattamente equivalenti, pertanto, ciascun sistema deve essere utilizzato indipendentemente dall'altro.

3.2.1 Terminologia

Riportiamo di seguito la definizione dei simboli utilizzati nella norma:

- A , area minima della sezione trasversale di un provino.
- CV , coefficiente di variazione statistica di un campione di popolazione per una determinata proprietà (in percentuale).
- G_{12} , modulo di elasticità tangenziale piano.
- n , numero di provini per la popolazione campione.

- P , carico sopportato dal provino in prova.
- P^{max} , massimo carico sopportato prima della rottura dal provino in prova.
- s_{n-1} , deviazione standard statistica di una popolazione campione per una data proprietà.
- x_i , risultato del test per un singolo provino di una popolazione campione per una data proprietà.
- \bar{x} , media di una popolazione campione per una determinata proprietà.
- δ , spostamento estensionale.
- ε , simbolo generale per la deformazione, sia essa longitudinale o trasversale.
- τ_{12} , sollecitazione di taglio sul piano perpendicolare all'asse 1 che agisce parallelamente all'asse 2 (vedi Figura 3.6 e 3.7).
- τ_{12}^m , il valore calcolato della sollecitazione di taglio τ_{12} presa al minore tra (1) massimo sforzo di taglio prima della rottura o (2) sforzo di taglio al 5% della deformazione di taglio.
- γ_{12} , deformazione di taglio sul piano perpendicolare all'asse 1 che agisce parallelamente all'asse 2.
- γ_{12}^m , il valore calcolato della deformazione di taglio γ_{12} presa al minore tra (1) massimo sforzo di taglio prima della rottura o (2) sforzo di taglio al 5% della deformazione di taglio.

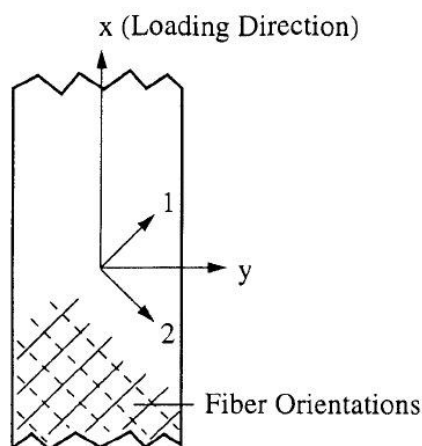


Figura 3.6, definizione degli assi del provino e del materiale: x e y rappresentano gli assi del provino, 1 e 2 rappresentano gli assi del materiale.

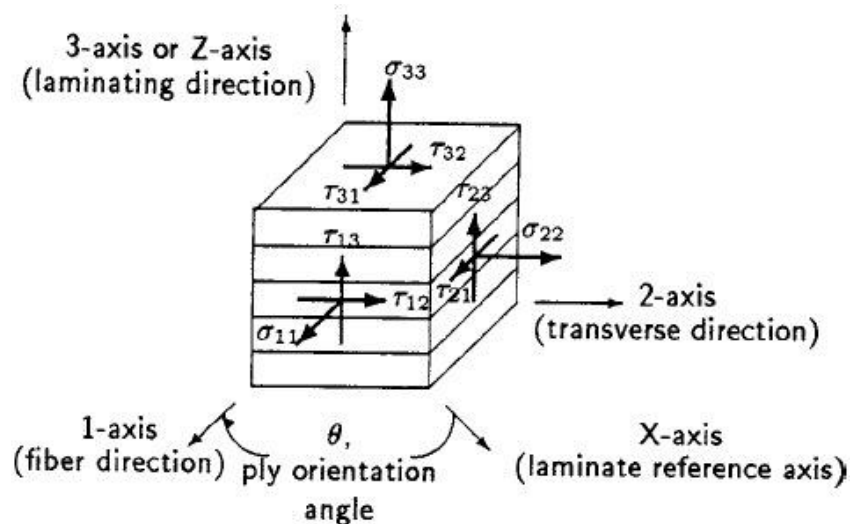


Figura 3.7, sistema di coordinate del materiale.

3.2.2 Sintesi del metodo di prova

Una prova di trazione monoassiale di un laminato a $\pm 45^\circ$ viene eseguita in conformità con il metodo di prova ASTM D 3039/D 3039M, sebbene con specifiche restrizioni su sequenza di laminazione e spessore. L'uso di questo test per la valutazione della risposta nel piano di taglio è stato originariamente proposto da Petit ed è stato in seguito migliorato da Rosen. Utilizzando espressioni derivanti dalla teoria dei laminati piani, lo sforzo di taglio piano nel sistema di coordinate del materiale è direttamente calcolato a partire dal carico assiale applicato, e il relativo sforzo di taglio è determinato dalla deformazione longitudinale e trasversale ottenuta dai dati di un trasduttore. Questi dati vengono usati per creare una curva tra lo sforzo di taglio e la deformazione di taglio.

3.2.3 Significato ed uso

Questo metodo di prova è progettato per ottenere dati relativi alle proprietà di taglio nel piano del materiale. I fattori che influenzano la risposta a taglio e che, pertanto, è utile riportare, sono i seguenti:

- Materiale.
- Metodi di preparazione del materiale e lay-up.
- Sequenza di laminazione del campione.

- Il contenuto di vuoti.
- La percentuale di rinforzo sul volume totale.
- La preparazione del provino.
- Le condizioni del provino.
- L'ambiente di test.
- L'allineamento e il fissaggio del provino.
- La velocità di test.
- L'andamento della temperatura durante la prova.

Le proprietà che possono essere ottenute da questo metodo di prova sono le seguenti:

- Risposta della deformazione di taglio allo sforzo di taglio piano.
- Modulo di elasticità tangenziale.
- Proprietà di offset di taglio.
- Sforzo di taglio piano massimo di un laminato a $\pm 45^\circ$ e massima deformazione di taglio piano per un laminato a $\pm 45^\circ$.

3.2.4 Apparato

L'apparato deve essere in accordo con il metodo di prova ASTM D 3039. Tuttavia, questo metodo richiede che i dati relativi al carico normale e alla deformazione vengano misurati sia in direzione longitudinale che trasversale sul provino.

3.2.5 Campionamento e specifiche dei provini

Il campionamento delle misure deve essere conforme con il metodo di prova ASTM D 3039. La geometria del provino deve essere conforme con il metodo di prova ASTM D 3039, ma con le seguenti modifiche:

- La sequenza di laminazione deve essere $[45/-45]_n$ s, dove $4 \leq n \leq 6$ per gli unidirezionali (16, 20 o 24 strati) e $2 \leq n \leq 4$ per i tessuti (8, 12, o 16 strati).

- La larghezza raccomandata del provino è di 25 mm [1,0 pollici] e l'intervallo di lunghezza è da 200 a 300 mm [da 8 a 12 pollici], estremi inclusi.

La preparazione del campione deve essere conforme al metodo di prova ASTM D 3039/D 3039M.

3.2.6 Procedura e parametri di prova

Eseguire una prova di trazione su provino laminato a $\pm 45^\circ$ conformemente al metodo di prova ASTM D 3039/D 3039M, con normale strumentazione di registrazione per la deformazione in direzione longitudinale e trasversale e continua o quasi continua registrazione dei dati per quanto riguarda il carico normale e la deformazione. Se la rottura finale non si verifica entro una deformazione di taglio del 5%, i dati sono troncati al raggiungimento di tale valore. Quando i dati sono troncati, ai fini del calcolo, il massimo dello sforzo di taglio deve essere considerato al 5% della deformazione di taglio. Qualsiasi troncamento dei dati deve essere riportato nella relazione.

3.2.7 Elaborazione dei dati sperimentali

La sollecitazione massima di taglio nel piano per il laminato a $\pm 45^\circ$ può essere calcolata utilizzando l'Eq 1. I risultati sono riportati con tre cifre significative. Se deve essere calcolato il modulo di taglio, la sollecitazione di taglio in ogni punto richiesto si determina utilizzando l'Eq 2.

$$\tau_{12}^m = P^{max} / 2A \quad (1)$$

$$\tau_{12i} = P_i / 2A \quad (2)$$

Dove:

- τ_{12}^m = sforzo di taglio massimo in MPa.
- P^{max} = forza massima prima della rottura in N.
- τ_{12i} = sforzo di taglio nel punto i-esimo in MPa.
- P_i = forza nel punto i-esimo in N.
- A = area della sezione trasversale in mm^2 .

Se devono essere calcolati il modulo di taglio o la deformazione di taglio massimo, la deformazione di taglio per ogni punto si calcola utilizzando l'Eq 3. La deformazione di taglio massima è determinata dall'Eq 4 (riportare i risultati con tre cifre significative).

$$\gamma_{12i} = \varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi} \quad (3)$$

$$\gamma_{12}^m = \max \{ 5\% \gamma_{12} \text{ al massimo dello sforzo di taglio} \} \quad (4)$$

Dove:

- γ_{12i} = deformazione di taglio nel punto i-esimo in $\mu\varepsilon$.
- ε_{xi} = deformazione longitudinale nel punto i-esimo in $\mu\varepsilon$.
- ε_{yi} = deformazione trasversale nel punto i-esimo in $\mu\varepsilon$.
- γ_{12}^m = deformazione di taglio massima in $\mu\varepsilon$.

Il modulo di elasticità di taglio si valuta utilizzando l'Eq 5, applicata su un range di deformazione di taglio di $4000 \pm 200 \mu\varepsilon$, prendendo come punto d'inizio di tale range un valore di deformazione compreso tra 1500 e 2500 $\mu\varepsilon$ inclusi. Ad esempio un range di calcolo che va da 2000 a 6000 $\mu\varepsilon$ è il corrispettivo, per i materiali a $\pm 45^\circ$ con un coefficiente di Poisson prossimo ad 1, del range compreso tra 1000 e 3000 $\mu\varepsilon$ utilizzato per la normativa ASTM D 3039/D 3039M. Il modulo di elasticità tangenziale viene riportato con tre cifre significative. Anche il range di deformazione di taglio utilizzata nel calcolo deve essere riportato.

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (5)$$

Dove:

- G_{12} = modulo di elasticità tangenziale piano in GPa.
- $\Delta\tau_{12}$ = differenza di sforzo di taglio applicato tra due punti di deformazione di taglio in MPa.
- $\Delta\gamma_{12}$ = differenza di deformazione di taglio tra due punti in $\mu\epsilon$.

Nel caso il materiale presentasse una regione di transizione (un significativo cambio di pendenza nella curva sforzo-deformazione) nel range precedentemente indicato, è opportuno scegliere un differente intervallo di deformazioni per il calcolo del modulo di elasticità. L'estremo massimo del nuovo range dovrà essere preso ad un valore pari al 90% del limite superiore della regione essenzialmente lineare, arrotondandolo al più vicino 500 $\mu\epsilon$. Ogni presenza di regioni di transizione deve essere riportata, insieme al range di deformazioni utilizzato.

Per ogni serie di prove deve essere calcolato il valore medio, la deviazione standard e il coefficiente di variazione (percentuale) per ogni proprietà determinata, usando rispettivamente le Eq 6, 7 e 8.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (7)$$

$$CV = 100 \times \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (8)$$

Dove:

- \bar{x} = valore medio della proprietà.
- s_{n-1} = deviazione standard.
- CV = coefficiente di variazione percentuale.
- n = numero di campioni.
- x_i = proprietà misurata.

4 Estensimetria

4.1 Introduzione

L'estensimetro a resistenza (in inglese strain gage) è un sensore semplice e preciso per la misura di deformazioni statiche e dinamiche che si applica alla superficie di corpi sottoposti a carico.

Il modo di operare dell'estensimetro elettrico è il seguente: un conduttore (principalmente utilizzate sono le leghe di rame e nickel), soggetto ad una deformazione (positiva o negativa) lungo il suo asse manifesta una variazione di resistenza elettrica legata alla deformazione subita.

Se il conduttore, opportunamente collocato su un supporto di materiale di basso modulo elastico (tale cioè da non interferire nella trasmissione della deformazione dalla superficie al conduttore, ma in grado di fornire il necessario isolamento elettrico), è reso solidale (per esempio mediante incollaggio), alla superficie di un corpo soggetto a deformazione, dalla misura della variazione di resistenza elettrica è possibile risalire alla misura della deformazione del corpo nell'area di applicazione dello strain gage e nella direzione dell'asse del conduttore. La misura di una variazione relativa di resistenza elettrica può essere effettuata più accuratamente rispetto alla misura diretta di uno spostamento relativo tra due punti.

La minima dilatazione rilevabile, cioè la risoluzione del sensore, è dell'ordine di grandezza di 10^{-6} m/m, cioè 1 $\mu\text{m}/\text{m}$. Sottoponendo il conduttore (non necessariamente di sezione circolare), ad un allungamento o ad una riduzione di lunghezza si otterrà conseguentemente anche una variazione della sezione, rispettivamente con una contrazione o con una dilatazione in senso trasversale.

Un conduttore con sezione costante S , lunghezza l e resistività ρ offre una resistenza elettrica espressa dalla relazione:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Se ne deduce quindi che R varia per due motivi, per variazione della lunghezza Δl e della sezione ΔS del conduttore dovuti alla variazione della geometria conseguente alla deformazione elastica, e per la variazione della resistività ρ del materiale conseguente alla deformazione del conduttore (vedi Figura 4.1).

Negli estensimetri elettrici metallici tuttavia è il termine dovuto alla variazione delle dimensioni ad essere preponderante.

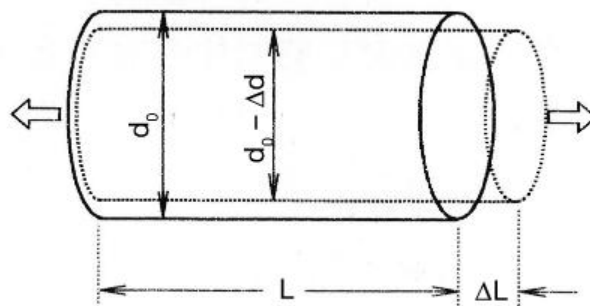


Figura 4.1, variazioni geometriche di un conduttore sottoposto a carico.

4.2 Valori caratteristici della resistenza elettrica

I più comuni strain gage disponibili sul mercato hanno valori di resistenza pari a 120, 350, 600 e 1000 Ω . Nel campo della ingegneria strutturale l'ordine di grandezza della minima deformazione ϵ che richiede di essere rilevata è 10^{-6} m/m, mentre la massima, per sollecitazioni in campo elastico, è dell'ordine di grandezza di 10^{-2} m/m.

Se si indica con $1\mu\epsilon = 10^{-6}$ m/m (unità di misura comunemente usata per indicare le deformazioni), si può scrivere la seguente relazione:

$$1 \mu\epsilon \leq \epsilon \leq 10^4 \mu\epsilon$$

Poiché vale la relazione:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$$

Si ha:

$$10^{-6} \text{ m/m} \leq \frac{\Delta R}{KR} \leq 10^{-2} \text{ m/m}$$

Dove R indica la resistenza originale del gage, ΔR la variazione di resistenza dovuta alla deformazione e K è il fattore dell'estensimetro (gage factor), cioè il fattore di proporzionalità tra la variazione di resistenza e la dilatazione in senso longitudinale.

Con una resistenza di circa 100Ω , prossima al valore minimo disponibile per gli estensimetri commerciali, e un valore di K pari a 2, il valore della variazione di resistenza è compreso nell'intervallo:

$$2 \cdot 10^{-4} \Omega \leq \Delta R \leq 2 \Omega$$

Si ha quindi che la corrispondenza tra $1 \mu\varepsilon$ e la variazione di resistenza di un estensimetro è di circa $2 \cdot 10^{-4} \Omega$. Per estensimetri da 120Ω ad una deformazione di $1 \mu\varepsilon$ corrisponde una variazione di resistenza pari a $2,4 \cdot 10^{-4} \Omega$.

Con la tecnologia di costruzione a filo conduttore, questa resistenza corrispondeva ad un valore della lunghezza minima pari a circa 100 mm .

Valori più grandi di resistenza sarebbero preferibili per aumentare la variazione della resistenza misurabile, ma sono limitati dalla corrispondente lunghezza massima del conduttore. Per quanto visto, una resistenza di 1000Ω può essere considerata un limite superiore nelle applicazioni ingegneristiche.

Da quanto esposto si comprende allora perché il conduttore sia disposto a serpentina (vedi Figura 4.2), ciò consente una misura il più puntuale possibile dello stato di deformazione. Oggi, con la tecnologia

della fotoincisione, si producono estensimetri da 3,8 a 5 μm di spessore, con valori di resistenza di 120 Ω anche con lunghezze più piccole di quelle viste nel caso del conduttore a filo (si arrivano a costruire estensimetri di 0,2 mm di lunghezza di griglia). La griglia è posta tra due sottili pellicole plastiche, quella inferiore funge da supporto e offre la base di incollaggio mentre quella superiore ha funzione prettamente protettiva.

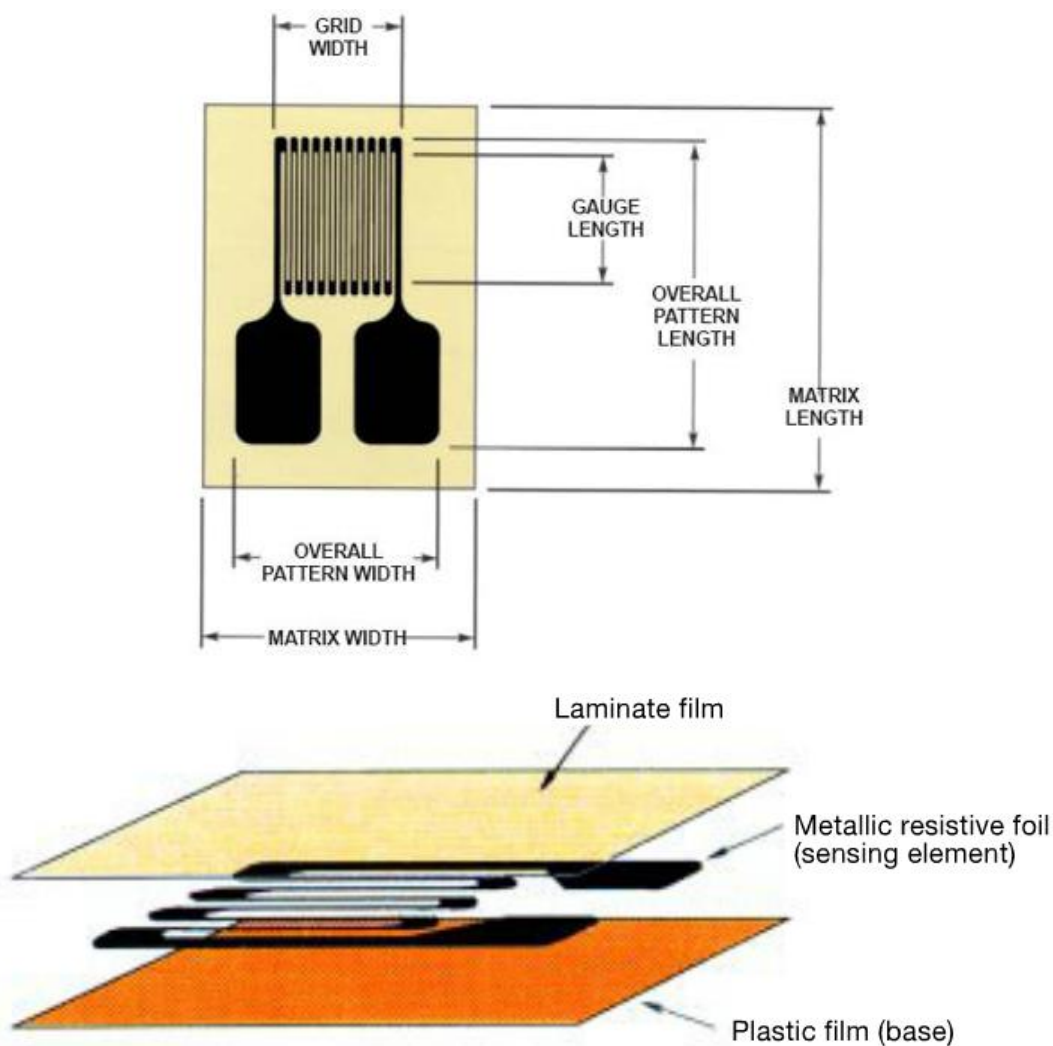


Figura 4.2, dimensioni caratteristiche e struttura di uno strain gage.

Esiste infine una seconda condizione che fissa un altro limite inferiore per la resistenza. Esso deriva dall'incremento di temperatura massimo ammesso per la griglia dell'estensimetro, dovuto alla parte di calore non dissipato, generato per effetto Joule. Questa parte è legata ovviamente alle condizioni di smaltimento termico dell'estensimetro.

Una variazione di temperatura dell'estensimetro durante la prova, dà origine a dilatazioni apparenti e a derive delle misure. Il valore della corrispondente deformazione apparente può essere anche maggiore della deformazione reale che si intende misurare, se non si ricorre ad una compensazione automatica del fenomeno con estensimetri autocompensati e/o a disposizioni circuitali opportune che cancellino questo effetto o ad una correzione della lettura sulla base di valori indicati dal costruttore in funzione della temperatura.

4.3 Circuito di misura, il ponte di Wheatstone

Il ponte di Wheatstone permette di ricondurre la misura della variazione di resistenza della griglia ad una misura di una variazione di tensione elettrica. È ottenuto disponendo due circuiti potenziometrici in opposizione, nel modo indicato in Figura 4.3.

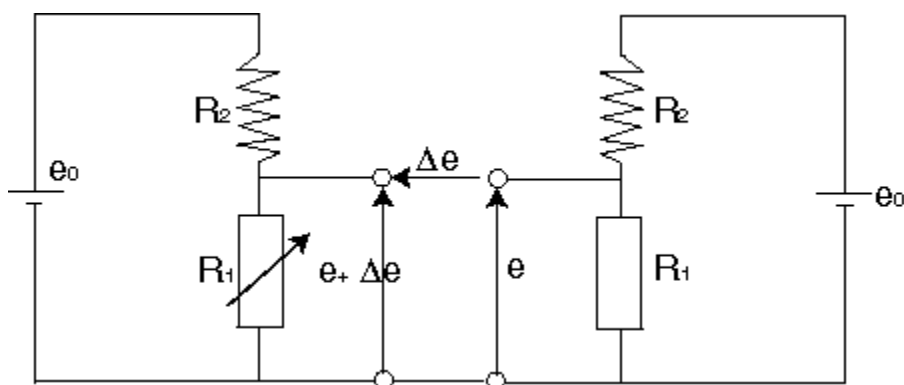


Figura 4.3, doppio circuito potenziometrico in opposizione.

Il segnale in uscita contiene solo il termine Δe . Questo circuito offre un altro vantaggio: può operare somme e sottrazioni di segnali, rispettivamente a seconda che consideri due rami adiacenti od opposti, una proprietà che può essere utilmente impiegata per molte applicazioni.

Ridisegnando il circuito precedente, otteniamo la rappresentazione più classica del ponte di Wheatstone, con le quattro resistenze, mostrata in Figura 4.4.

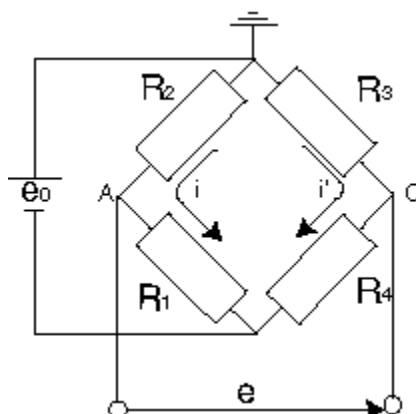


Figura 4.4, rappresentazione classica del ponte di Wheatstone.

L'equazione del circuito, generalizzato con quattro resistenze diverse e potenzialmente tutte variabili, è la seguente:

$$e = V_C - V_A = R_3 i' - R_2 i = \left(\frac{R_3}{R_3 R_4} - \frac{R_2}{R_2 R_1} \right) e_0$$

Se si equilibra il ponte variando alcune resistenze fino ad annullare la tensione in uscita, indicando con le stesse lettere le resistenze variate si ha $e = 0$ per:

$$\frac{R_3}{R_3 R_4} = \frac{R_2}{R_2 R_1}$$

cioè:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Se si opera in questo modo si può determinare con grande precisione la variazione di resistenza di un estensimetro (per esempio R_1) dalla conoscenza delle altre tre resistenze senza avere correnti nella diagonale in uscita e senza supporre la stabilità della tensione di alimentazione, che non interviene nella relazione di equilibrio.

Sostituendo ad esempio ad R_1 uno strain gage, quando quest'ultimo è sottoposto ad una deformazione si registra un cambio della sua resistenza ΔR e di conseguenza il ponte dà in uscita un voltaggio corrispondente e :

$$e = \frac{\Delta R e_0}{4R} = \frac{K \varepsilon e_0}{4}$$

Poiché tutti i valori della precedente equazione (tranne ε), sono noti o possono essere misurati, la deformazione ε può essere determinata misurando semplicemente il valore di output della tensione del bridge.

4.4 Collegamenti

Collegamento a quarto di ponte. Si realizza disponendo sul lato contiguo a quello che prevede l'estensimetro una resistenza calibrata, vedi Figura 4.5.

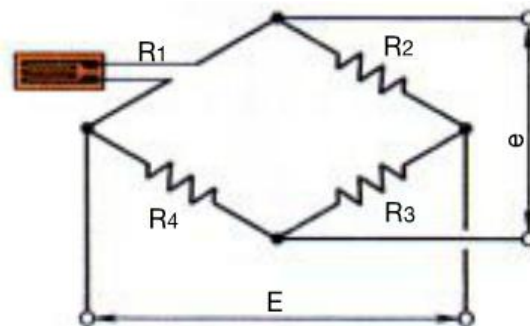


Figura 4.5, collegamento a quarto di ponte.

In questa disposizione si hanno cambi di resistenza su di un solo lato, quello in corrispondenza di R_1 , pertanto il voltaggio in uscita sarà:

$$e = \frac{\Delta R_1 e_0}{4R_1} = \frac{K \varepsilon_1 e_0}{4}$$

Questa disposizione non consente l'eliminazione della deformazione apparente dovuta ad una eventuale variazione di temperatura nel corso della prova. Può essere usata quando la temperatura si mantiene

costante per tutta la durata della prova o nel caso di impiego di estensimetri autocompensati.

Collegamento a mezzo ponte. È realizzato disponendo su due rami adiacenti od opposti gli estensimetri, vedi Figura 4.6 a e b.

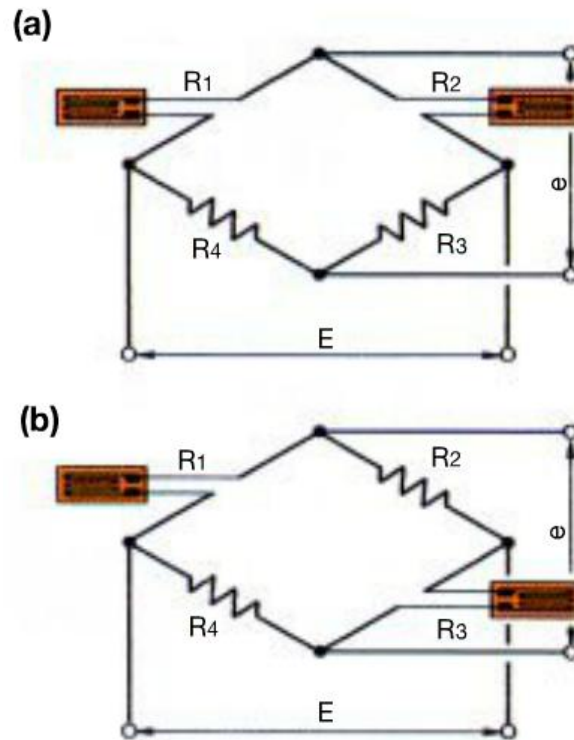


Figura 4.6, collegamento a mezzo ponte con disposizione degli strain gage su rami adiacenti e opposti.

Si hanno pertanto delle variazioni di resistenza su due lati. Nel caso di rami adiacenti come nella figura precedente la tensione in uscita vale:

$$e = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) e_0 = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) e_0$$

Mentre nel caso di rami opposti:

$$e = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) e_0 = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) e_0$$

Il collegamento a mezzo ponte, oltre all'eliminazione della deformazione apparente, può servire per aumentare la sensibilità del

ponte o, comunque, all'eliminazione delle grandezze che non interessano la misura.

La disposizione con strain gage collegati su rami adiacenti (montando fisicamente gli strain gage su facce opposte del provino) è utile per fornire la misura del doppio delle deformazioni flessionali (quindi con aumento della sensibilità della misura, poiché $\varepsilon_1 = -\varepsilon_4$ si ottiene $2\varepsilon_1$), eliminare eventuali deformazioni apparenti ed eventuali contributi di sforzo normale.

La disposizione con strain gage collegati su rami opposti porta invece all'eliminazione delle deformazioni flessionali, fornendo la misura del doppio della deformazione dovuta allo sforzo normale (quindi con aumento della sensibilità della misura, poiché $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$), ma introduce anche eventuali deformazioni apparenti (che, in questo caso, potrebbero essere eliminate con estensimetri autocompensati).

Il collegamento a mezzo ponte è anche utilizzato per l'eliminazione di disturbi di natura termica tramite l'utilizzo del dummy, un secondo estensimetro, attaccato ad un provino della stessa natura di quello da testare e sottoposto alle stesse condizioni di temperatura ambientale, ma privo di carichi applicati (Figura 4.7). Il dummy è collegato nel ramo adiacente allo strain gage attivo sul provino e poiché le condizioni termiche sono le stesse, il segnale di output e è compensato. La configurazione utilizzata durante le prove oggetto di questa tesi rispecchia quest'ultima tipologia, due ponti di Wheatstone, uno per le misurazioni longitudinali e uno per la trasversali, con uno strain gage attivo e un dummy (vedi Figura 4.8).

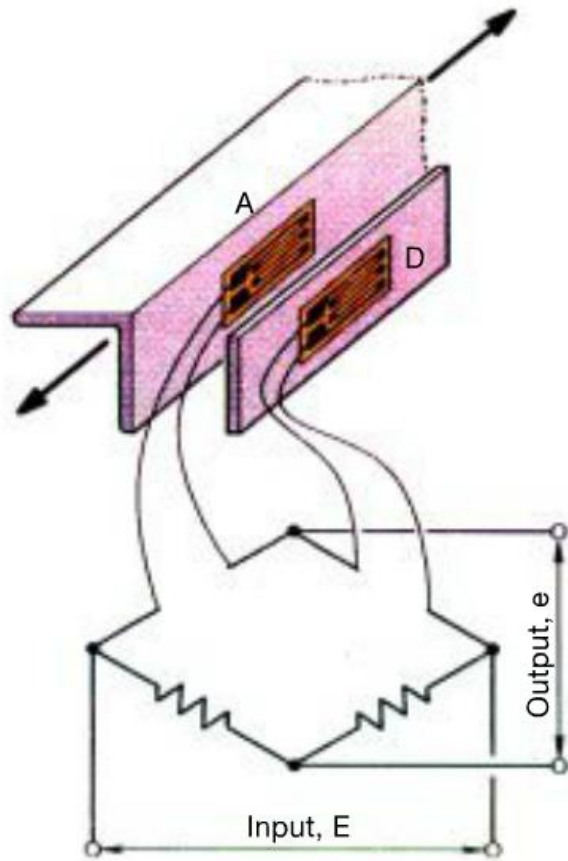


Figura 4.7, strain gage attivo A e relativo dummy D.



Figura 4.8, dummy longitudinale e trasversale utilizzati durante le prove.

4.5 Calibrazione del ponte

La calibrazione del ponte si rende necessaria per verificare che la centralina d'acquisizione risponda correttamente durante le prove di trazione. La calibrazione può essere fatta sbilanciando il ponte di una deformazione nota, corrispondente ad un'entità di tensione nota.

$$\frac{e}{e_0} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} = \frac{\varepsilon}{2}$$

Ricordando che $\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon$, con $K=2$.

Utilizzando come valori di deformazione 100, 200, 400, 1000 e 4000 $\mu\varepsilon$ ottengo i corrispettivi valori di tensione che interpolati mi danno la retta di calibrazione.

Per far ciò si utilizza un calibratore (Figura 4.11) che agisce sulla centralina di controllo del ponte (Figura 4.12).

In fase di utilizzo si ottiene quindi come uscita dallo strain gage una tensione a cui corrisponderà una deformazione secondo la retta di interpolazione ottenuta in fase di calibrazione.

A titolo di esempio si riportano di seguito le due rette di calibrazione relative alle deformazioni longitudinali e trasversali (Figura 4.9 e 4.10).

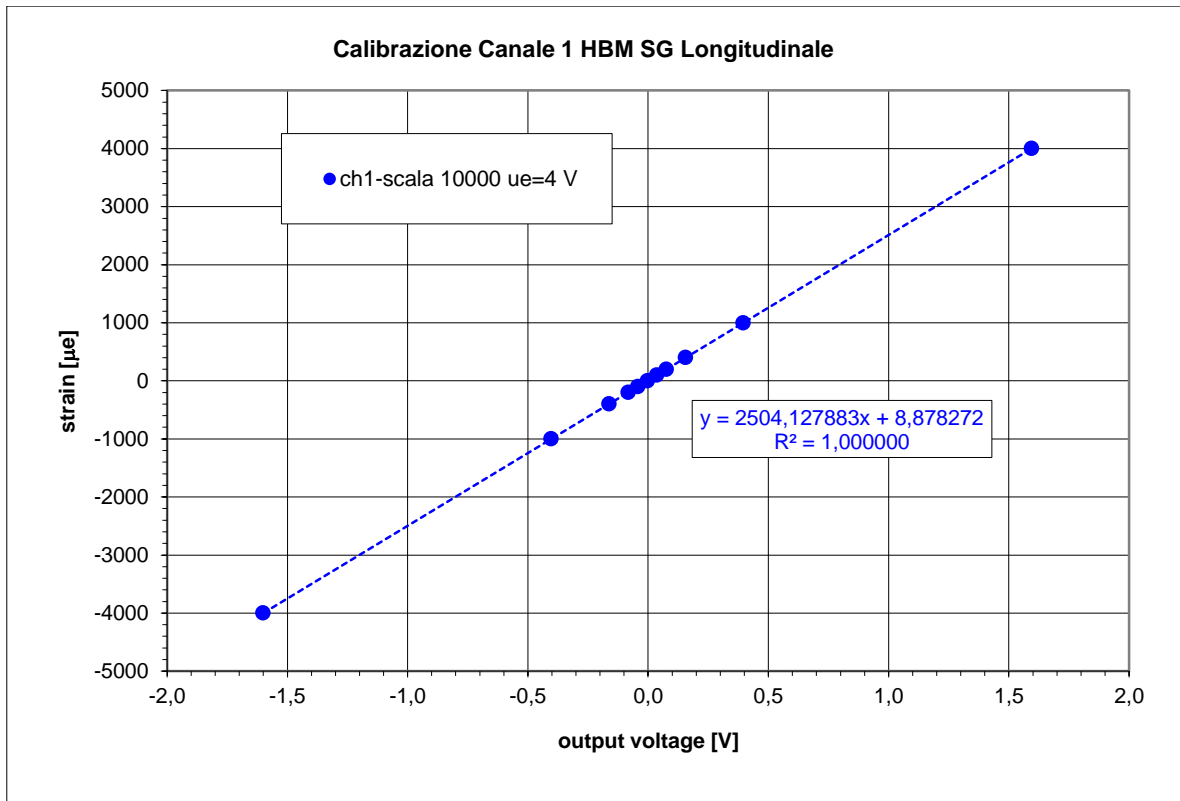


Figura 4.9, retta di calibrazione per lo strain gage longitudinale.

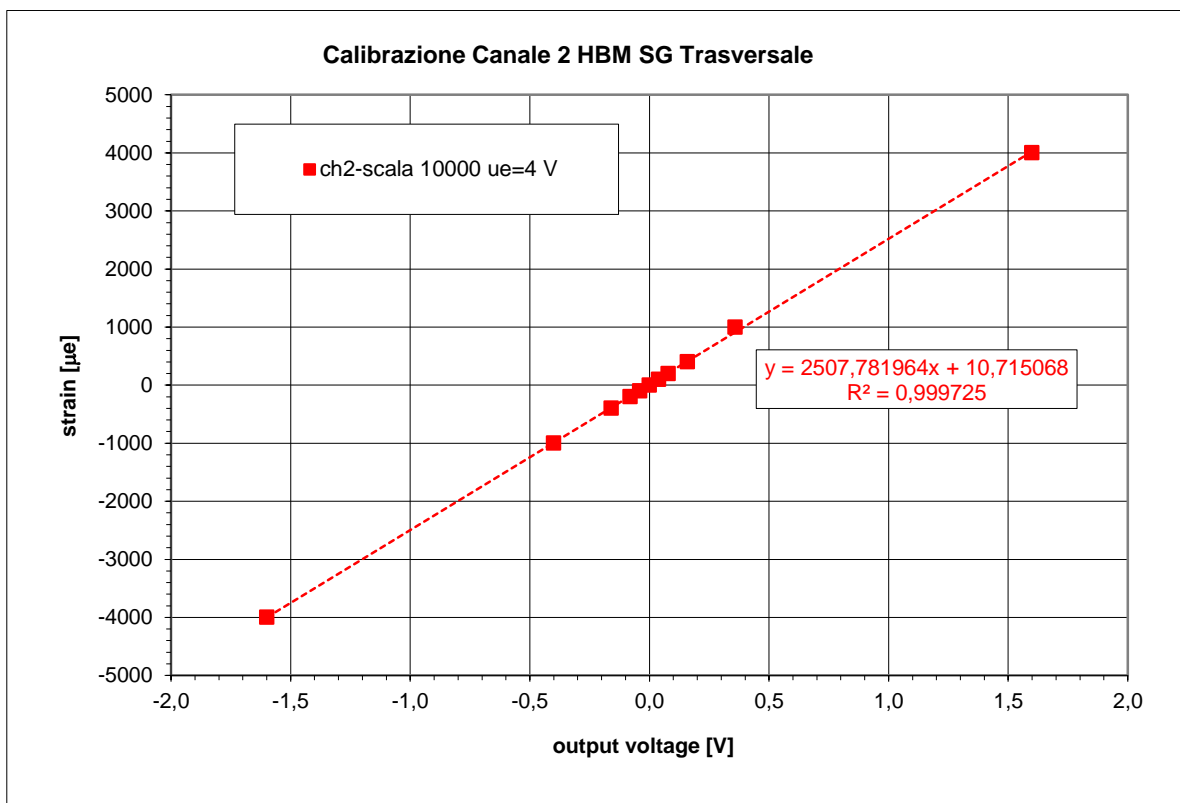


Figura 4.10, retta di calibrazione per lo strain gage trasversale.



Figura 4.11, calibratore HBM®.



Figura 4.12, centralina di controllo HBM®.

4.6 Procedura di incollaggio e collegamento strain gage

La procedura d'incollaggio degli strain gage al provino è costituita dai seguenti punti:

- 1) Carteggiare leggermente con cartavetrata molto fine (grana 320) la superficie prescelta del provino al fine di prepararla al meglio per l'incollaggio (Figura 4.13).

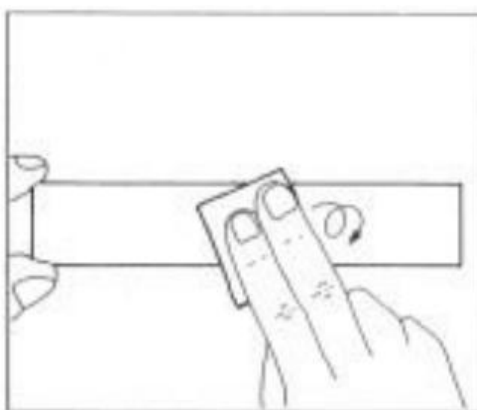


Figura 4.13.

- 2) Sgrassare l'area carteggiata bagnandola con una soluzione acquosa di acido fosforico (H_3PO_4) al 5% e lasciandola agire per un tempo compreso tra 3 e 4 minuti (Figura 4.14).

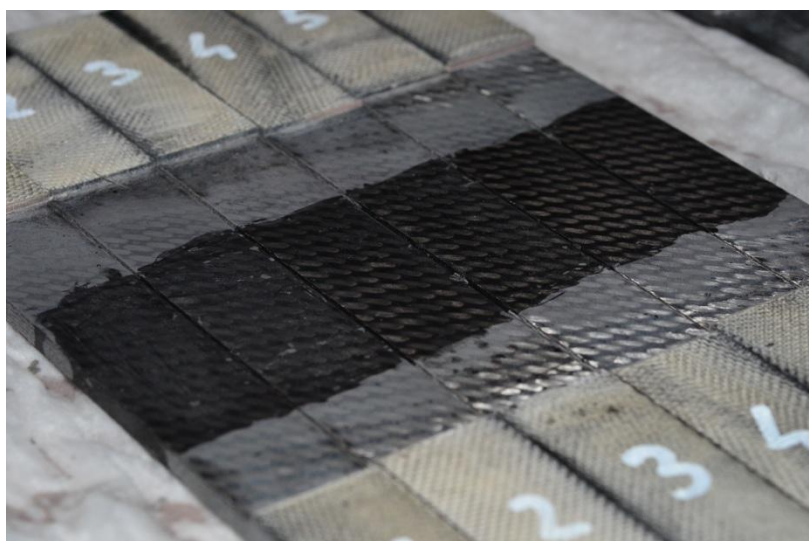


Figura 4.14, provini carteggiati e bagnati con soluzione acquosa di acido fosforico.

- 3) Asciugare la superficie con un foglio di carta assorbente, avendo cura di asciugare agendo in un solo verso per non spandere residui di polvere (eventualmente utilizzare aria compressa), come in Figura 4.15.

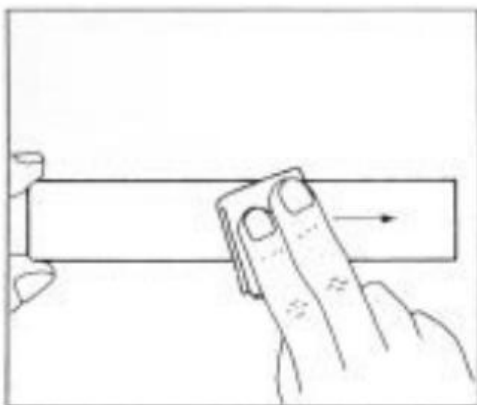


Figura 4.15.

- 4) Ribagnare il provino con una soluzione acquosa di ammoniaca (NH_3) lasciando agire per ulteriori 3-4 minuti.

- 5) Asciugare nuovamente come al punto 3.

- 6) Con l'utilizzo di un pennarello e un righello marcare un reticolo a croce nella mezzaria del provino al fine successivo di disporre al meglio l'estensimetro (Figura 4.16).

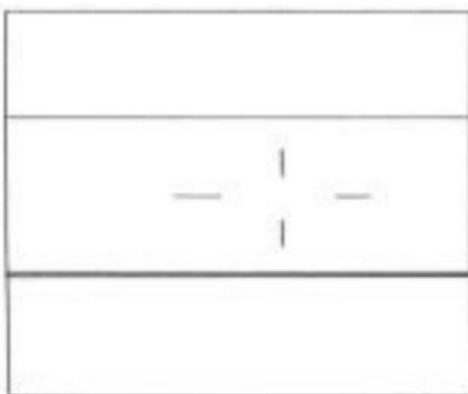


Figura 4.16.

7) Vincolare lo strain gage al provino con un pezzetto di scotch adesivo, avendo cura di non coprire con quest'ultimo la griglia dell'estensimetro e disponendo correttamente la griglia longitudinale e quella trasversale del gage nelle rispettive direzioni del provino allineando il gage con i segni fatti in precedenza (Figura 4.17).

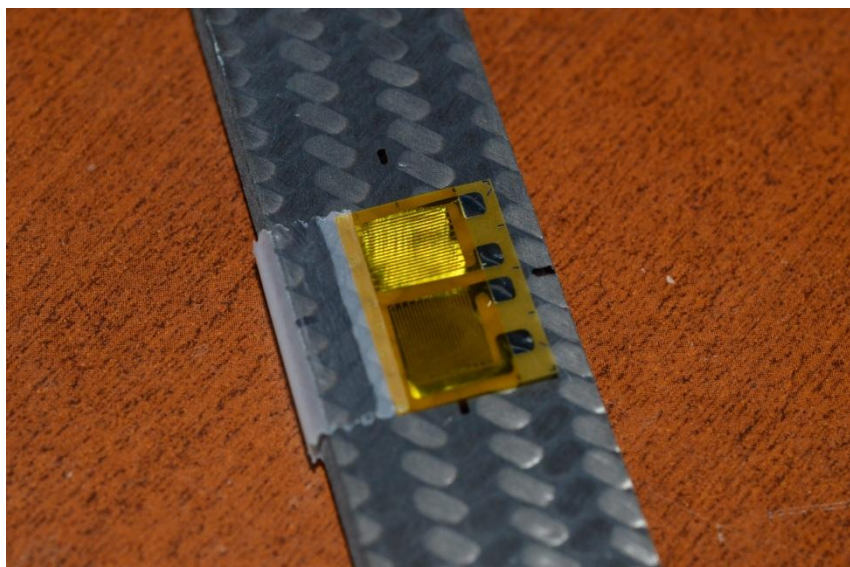


Figura 4.17, provino con reticolo di marcatura e strain gage fissato tramite adesivo.

8) Ribaltare con delle pinzette il gage lungo il lato su cui è presente lo scotch e con una spatolina piegare quest'ultimo lungo la linea di contatto con il provino (Figura 4.18).

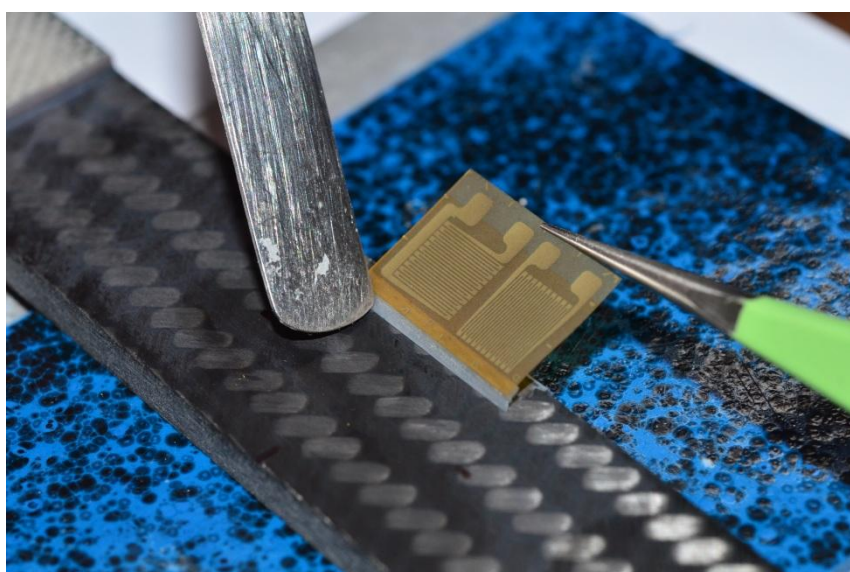


Figura 4.18, strain gage ribaltato con pinzetta e spatolina usata per piegare il nastro adesivo.

9) Applicare 3 gocce di colla al retro dello strain gage (Figura 4.19).

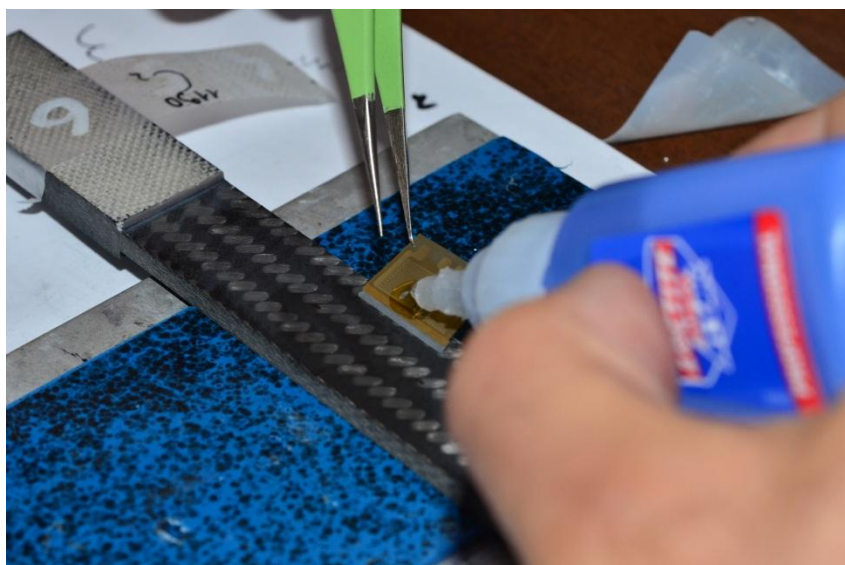


Figura 4.19, applicazione della colla al retro del gage.

10) Con un foglietto di teflon ribaltare il gage sul provino esercitando una forte pressione per 1 minuto (Figura 4.20).

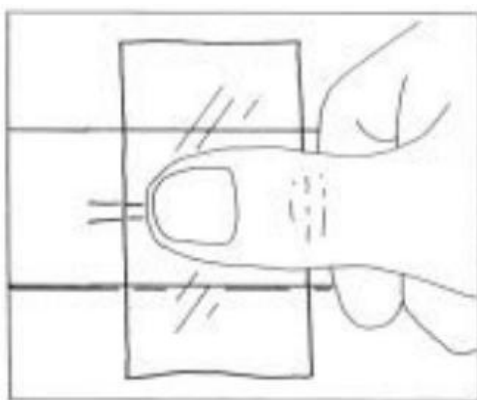


Figura 4.20.

11) Lasciar asciugare ulteriormente la colla mantenendo il gage sotto un peso per qualche ora.

Una volta ultimato l'incollaggio si procede alla verifica dell'estensimetro, tramite multimetro (strumento elettronico che integra in un'unica unità diverse funzioni per misurare grandezze quali tensione, corrente e resistenza elettrica), misurandone la resistenza sia a riposo che sottoponendolo a leggeri carichi di flessione. Nel caso le piste di contatto dell'estensimetro risultassero ricoperte da un sottile strato di colla, rendendo così impossibile la lettura della resistenza, si può procedere a liberarle con una sottile passata di cartavetrata. Si procede poi alla stagnatura dei contatti per ultimare il collegamento con i fili dell'apparato di misurazione (vedi Figura 4.21).

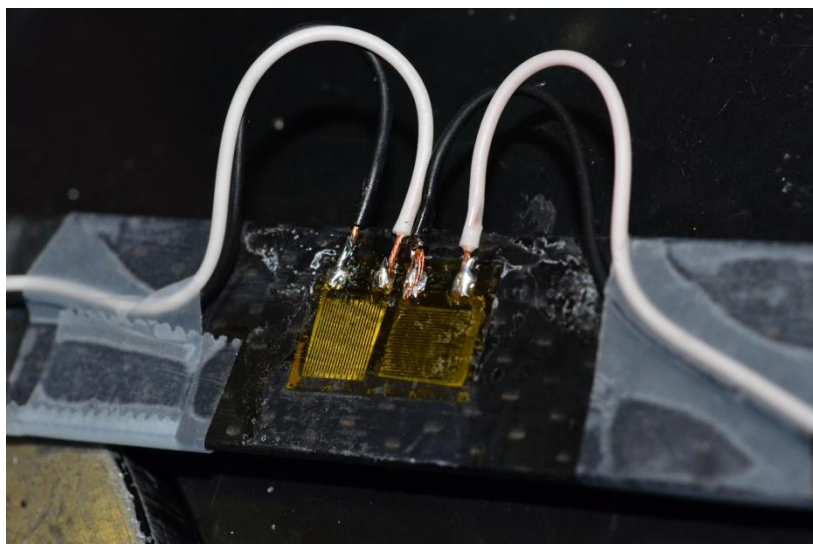


Figura 4.21, strain gage stagnato.

5 Risultati

In questo capitolo vengono riportate:

- Le misure delle dimensioni dei provini.
- I risultati delle prove di trazione eseguite (secondo la norma ASTM D 3039/D 3039M e ASTM D 3518/D 3518M).
- Le foto dei campioni prima e dopo le prove.

I materiali sottoposti a prova, ottenuti da laminazione di pre-impregnati, sono due:

- Un tessuto.
- Un unidirezionale.

In particolare per quanto riguarda il tessuto sono state provate 3 tipologie di campioni rispettivamente con orientazione a 0° , 90° e $\pm 45^\circ$.

Per l'unidirezionale sono state provate 2 tipologie di provini rispettivamente con orientazione a 0° e $\pm 45^\circ$. I provini a 90° non sono stati realizzati per difficoltà di carattere tecnologico.

5.1 Dimensioni dei provini

Le Tabelle da 5.1 a 5.3 riportano i valori dimensionali dei provini realizzati con il composito tessuto.

Nelle Figure da 5.1 a 5.3 si riportano le foto relative a ciascun campione prima delle prove.

Tabella 5.1, valori dimensionali dei provini di Tessuto 0°.

Tessuto 0°		Specimen 1	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,02	1,88	
2	19,99	1,90	
3	19,99	1,91	
4	20,00	1,89	
5	19,99	1,89	
Mean value	20,00	1,89	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 0°		Specimen 2	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,99	1,89	
2	20,00	1,90	
3	20,01	1,92	
4	20,01	1,91	
5	19,99	1,88	
Mean value	20,00	1,90	199,5
St. Deviation	0,01	0,02	

Tessuto 0°		Specimen 3	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,01	1,89	
2	20,00	1,91	
3	20,00	1,91	
4	20,01	1,90	
5	20,00	1,89	
Mean value	20,00	1,90	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 0°		Specimen 4	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,98	1,90	
2	19,97	1,89	
3	19,96	1,91	
4	19,96	1,90	
5	19,97	1,88	
Mean value	19,97	1,90	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 0°		Specimen 5	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,97	1,90	
2	19,97	1,92	
3	19,96	1,92	
4	19,97	1,91	
5	19,98	1,90	
Mean value	19,97	1,91	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 0°		Specimen 6	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,95	1,92	
2	19,98	1,93	
3	19,99	1,93	
4	19,96	1,92	
5	19,97	1,92	
Mean value	19,97	1,92	199,5
St. Deviation	0,02	0,01	

Tabella 5.2, valori dimensionali dei provini di Tessuto 90°.

Tessuto 90°		Specimen 1	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,07	2,56	
2	20,07	2,58	
3	20,08	2,59	
4	20,07	2,57	
5	20,08	2,56	
Mean value	20,07	2,57	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 90°		Specimen 2	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,01	2,56	
2	20,01	2,55	
3	20,01	2,56	
4	20,02	2,56	
5	20,01	2,54	
Mean value	20,01	2,55	199,5
St. Deviation	0,00	0,01	

Tessuto 90°		Specimen 3	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,07	2,54	
2	20,06	2,54	
3	20,07	2,54	
4	20,06	2,53	
5	20,05	2,53	
Mean value	20,06	2,54	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 90°		Specimen 4	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,05	2,54	
2	20,06	2,56	
3	20,05	2,55	
4	20,06	2,55	
5	20,06	2,53	
Mean value	20,06	2,55	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 90°		Specimen 5	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,07	2,54	
2	20,05	2,52	
3	20,06	2,54	
4	20,06	2,53	
5	20,06	2,52	
Mean value	20,06	2,53	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto 90°		Specimen 6	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,01	2,59	
2	20,02	2,58	
3	20,02	2,58	
4	20,02	2,58	
5	20,01	2,56	
Mean value	20,02	2,58	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Tabella 5.3, valori dimensionali dei provini di Tessuto $\pm 45^\circ$.

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 1	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,99	3,80	
2	20,00	3,81	
3	20,00	3,82	
4	20,01	3,78	
5	20,00	3,82	
Mean value	20,00	3,81	199
St. Deviation	0,01	0,02	

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 2	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,02	3,77	
2	20,05	3,79	
3	20,06	3,79	
4	20,05	3,79	
5	20,03	3,77	
Mean value	20,04	3,78	199
St. Deviation	0,02	0,01	

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 3	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,04	3,77	
2	20,04	3,78	
3	20,04	3,77	
4	20,04	3,77	
5	20,04	3,76	
Mean value	20,04	3,77	199
St. Deviation	0,00	0,01	

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 4	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,96	3,82	
2	19,98	3,84	
3	19,98	3,85	
4	19,98	3,84	
5	20,00	3,86	
Mean value	19,98	3,84	199
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 5	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,02	3,81	
2	20,02	3,80	
3	20,03	3,80	
4	20,03	3,80	
5	20,04	3,79	
Mean value	20,03	3,80	199
St. Deviation	0,01	0,01	

Tessuto $\pm 45^\circ$		Specimen 6	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	20,03	3,75	
2	20,00	3,76	
3	20,01	3,74	
4	20,00	3,76	
5	20,01	3,73	
Mean value	20,01	3,75	199
St. Deviation	0,01	0,01	

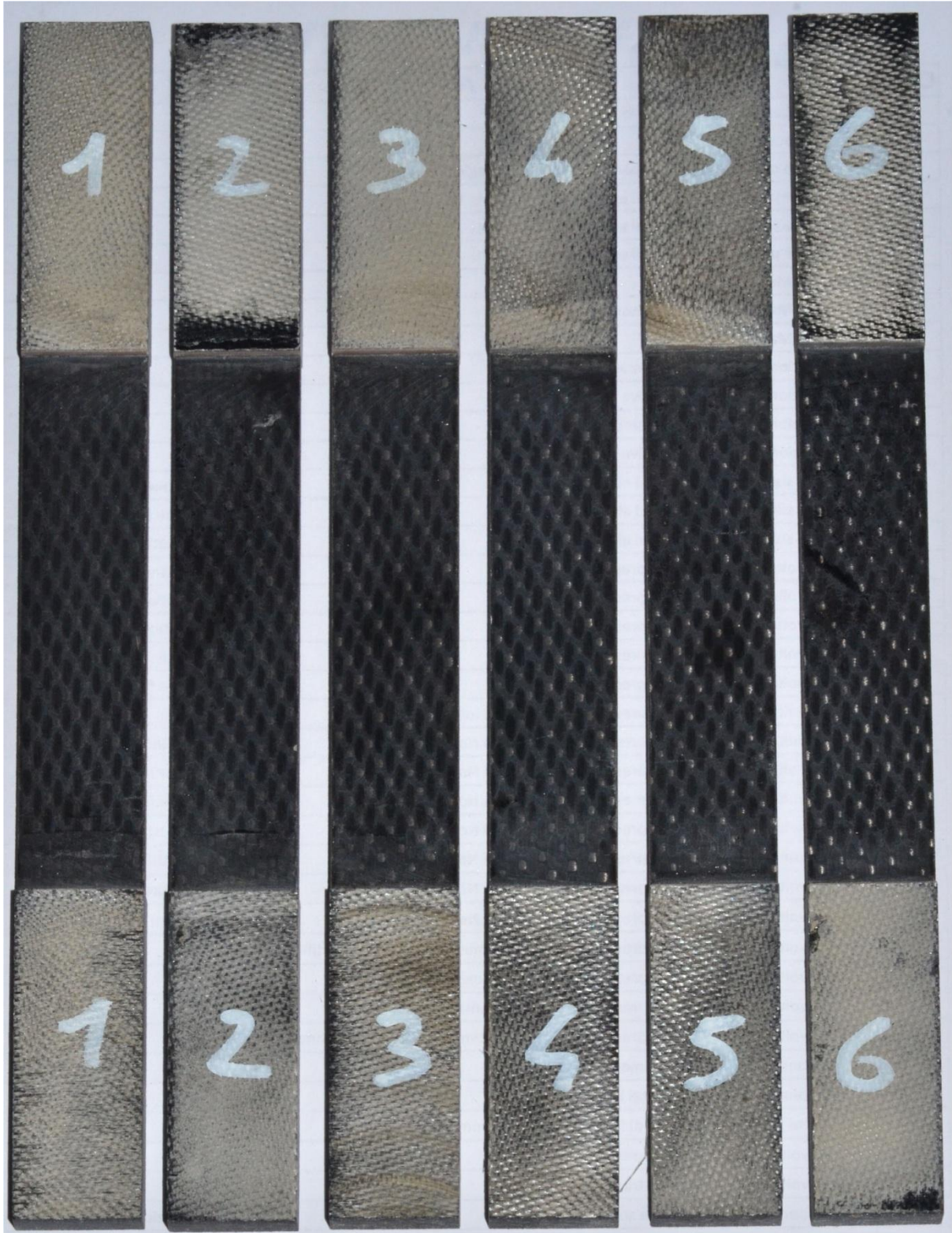


Figura 5.1, provini di Tessuto 0°.

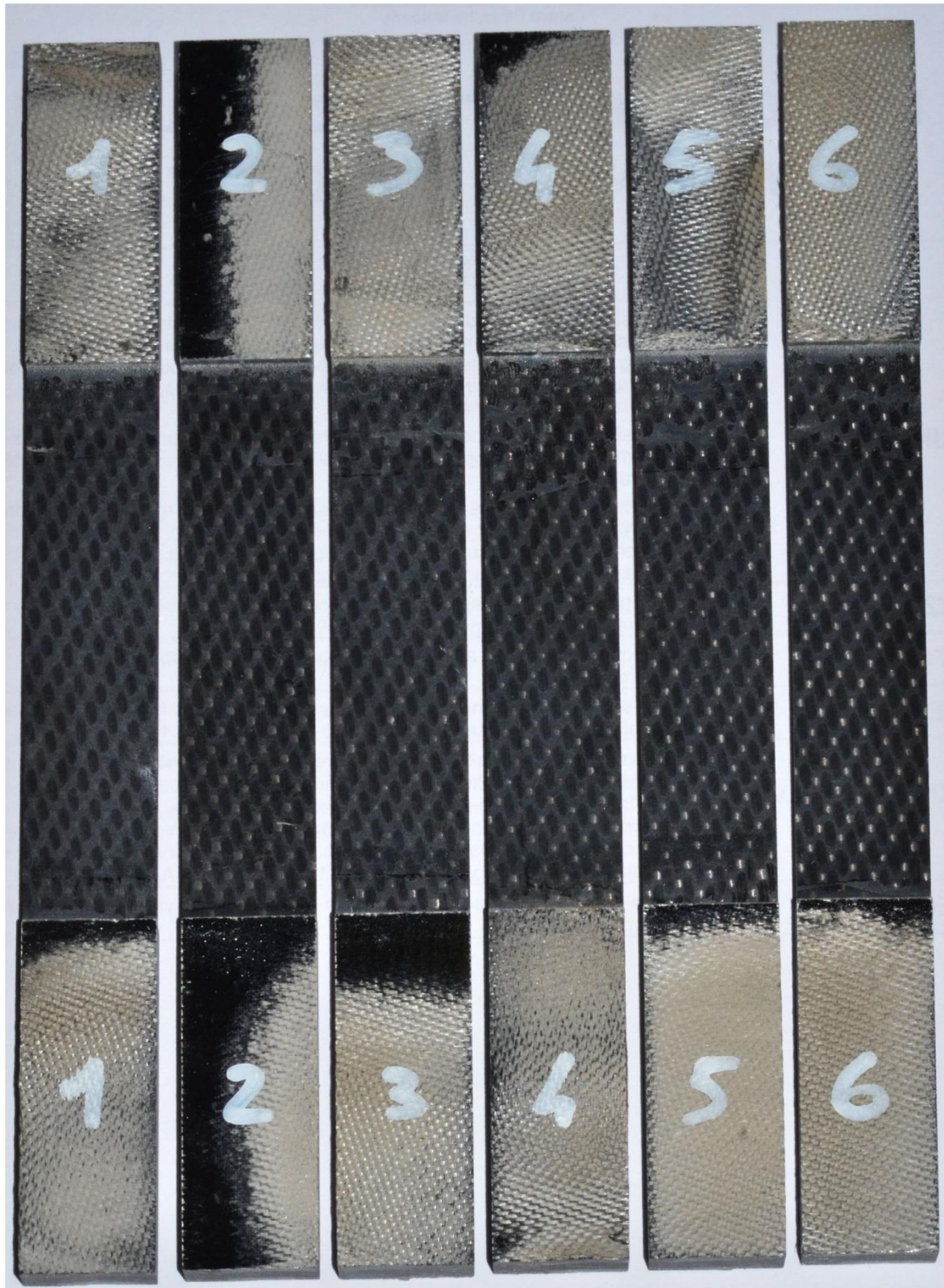


Figura 5.2, provini di Tessuto 90°.

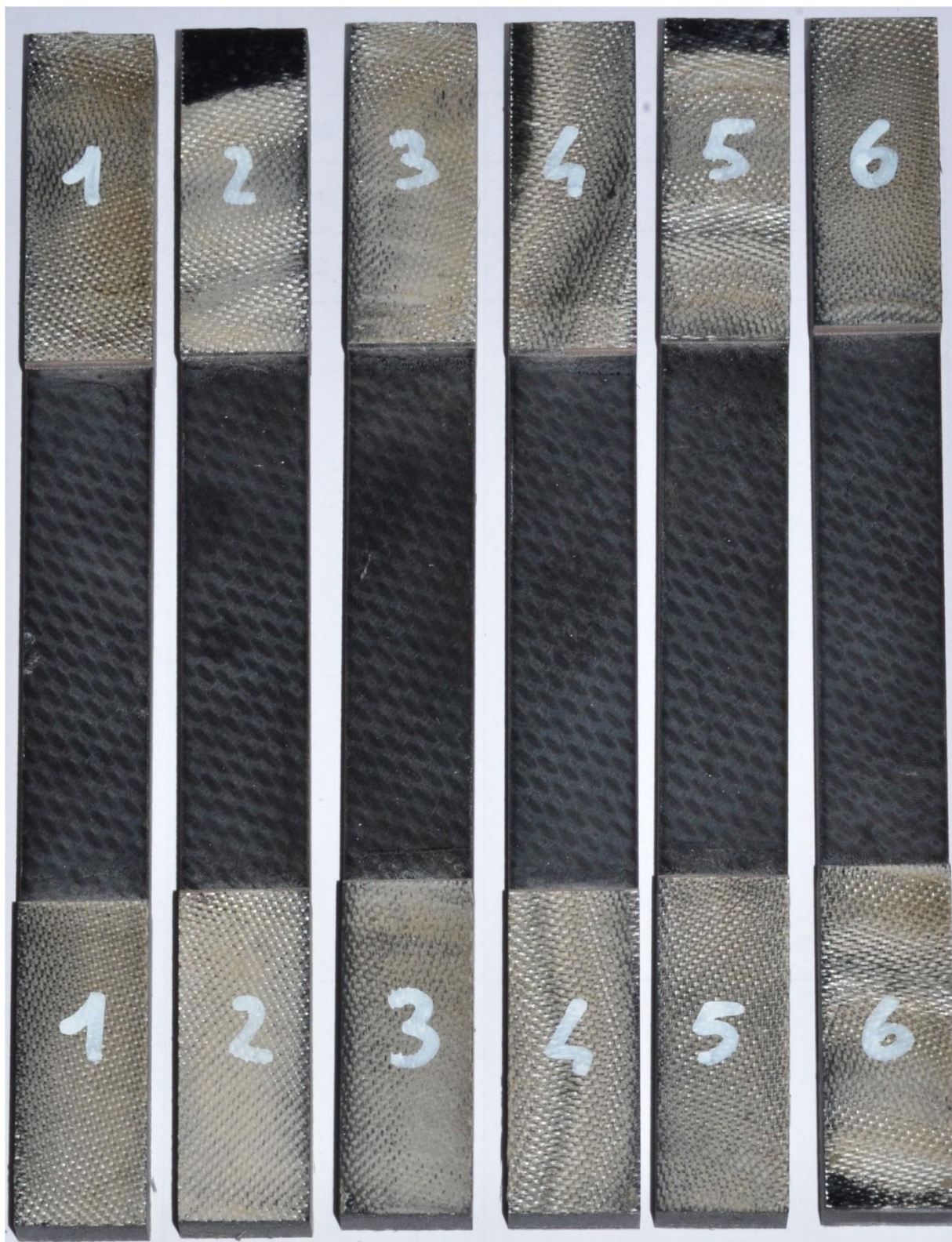


Figura 5.3, provini di Tessuto $\pm 45^\circ$.

Le Tabelle da 5.4 a 5.5 riportano i valori dimensionali dei provini realizzati con il composito unidirezionale.

Nelle Figure da 5.4 a 5.5 si riportano le foto di ciascun campione prima delle prove.

Tabella 5.4, valori dimensionali dei provini di Unidirezionale 0°.

Unidirezionale 0°		Specimen 1	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,81	0,88	
2	19,83	0,89	
3	19,86	0,90	
4	19,84	0,91	
5	19,87	0,91	
Mean value	19,84	0,90	199,5
St. Deviation	0,02	0,01	

Unidirezionale 0°		Specimen 2	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,87	0,90	
2	19,87	0,90	
3	19,90	0,92	
4	19,87	0,91	
5	19,89	0,91	
Mean value	19,88	0,91	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Unidirezionale 0°		Specimen 3	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,81	0,92	
2	19,80	0,92	
3	19,83	0,92	
4	19,83	0,92	
5	19,88	0,90	
Mean value	19,83	0,92	199,5
St. Deviation	0,03	0,01	

Unidirezionale 0°		Specimen 4	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,83	0,90	
2	19,82	0,89	
3	19,78	0,90	
4	19,79	0,88	
5	19,82	0,88	
Mean value	19,81	0,89	199,5
St. Deviation	0,02	0,01	

Unidirezionale 0°		Specimen 5	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,84	0,91	
2	19,84	0,90	
3	19,83	0,93	
4	19,85	0,92	
5	19,88	0,90	
Mean value	19,85	0,91	199,5
St. Deviation	0,02	0,01	

Unidirezionale 0°		Specimen 6	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,86	0,89	
2	19,85	0,93	
3	19,88	0,91	
4	19,89	0,91	
5	19,90	0,92	
Mean value	19,88	0,91	199,5
St. Deviation	0,02	0,01	

Tabella 5.5, valori dimensionali dei provini di Unidirezionale $\pm 45^\circ$.

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 1	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,95	1,78	
2	19,98	1,82	
3	19,97	1,83	
4	19,97	1,83	
5	19,98	1,78	
Mean value	19,97	1,81	199,5
St. Deviation	0,01	0,03	

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 2	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,91	1,74	
2	19,93	1,80	
3	19,92	1,81	
4	19,93	1,81	
5	19,92	1,79	
Mean value	19,92	1,79	199,5
St. Deviation	0,01	0,03	

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 3	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,98	1,83	
2	19,97	1,83	
3	19,98	1,83	
4	19,99	1,83	
5	19,98	1,81	
Mean value	19,98	1,83	199,5
St. Deviation	0,01	0,01	

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 4	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,97	1,78	
2	19,98	1,82	
3	19,98	1,81	
4	19,97	1,82	
5	19,97	1,82	
Mean value	19,97	1,81	199,5
St. Deviation	0,01	0,02	

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 5	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,96	1,84	
2	19,96	1,83	
3	19,95	1,83	
4	19,94	1,83	
5	19,93	1,83	
Mean value	19,95	1,83	199,5
St. Deviation	0,01	0,00	

Unidirezionale $\pm 45^\circ$		Specimen 6	
n° measure	Width [mm]	Thickness [mm]	Length [mm]
1	19,98	1,82	
2	19,97	1,82	
3	19,96	1,82	
4	19,98	1,81	
5	19,96	1,76	
Mean value	19,97	1,81	199,5
St. Deviation	0,01	0,03	



Figura 5.4, provini di Unidirezionale 0°.

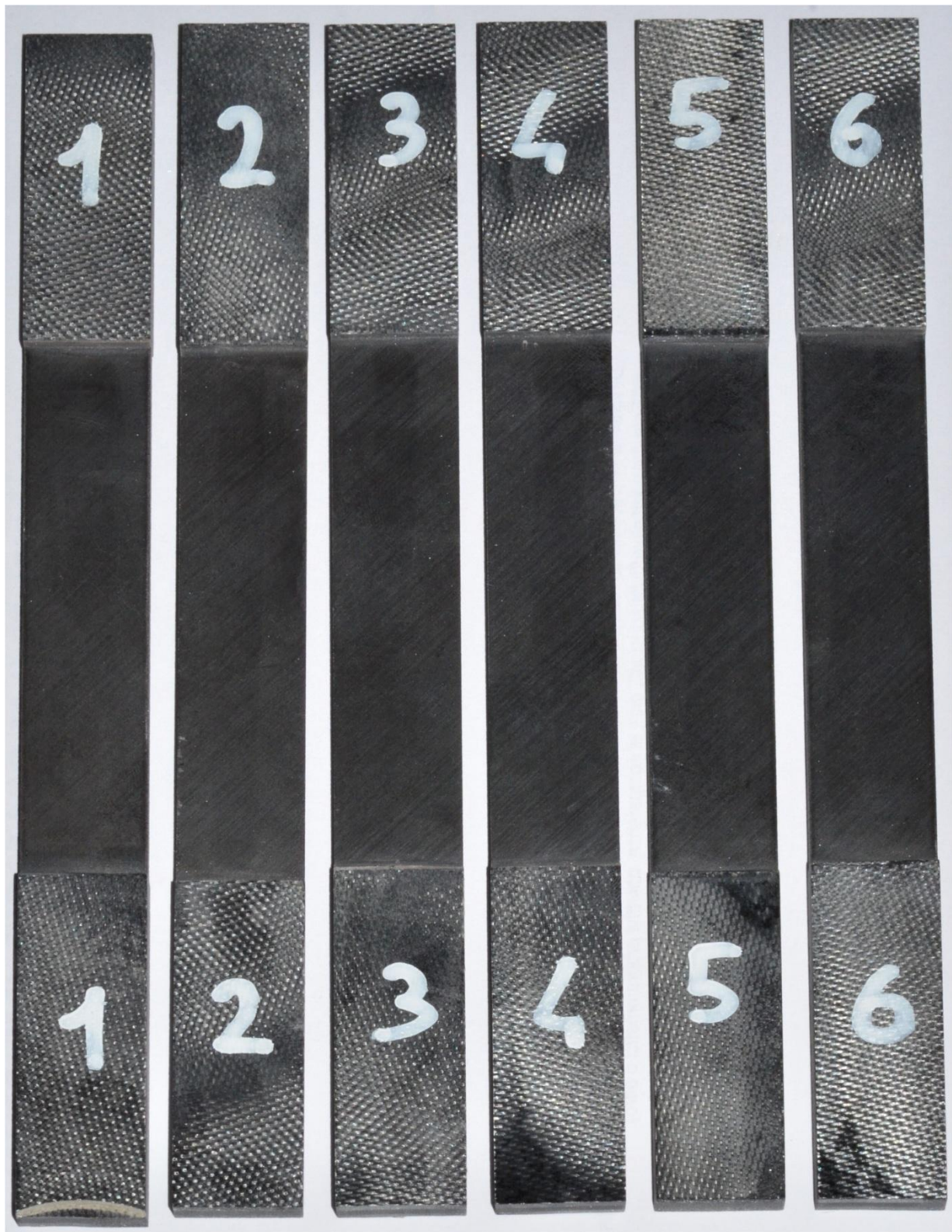


Figura 5.5, provini di Unidirezionale $\pm 45^\circ$.

5.2 Risultati prove di trazione

Nelle Tabelle 5.6 e 5.7 vengono presentati i risultati delle prove di trazione eseguite e le modalità di rottura riportate da ogni provino.

I dati riportati nelle due tabelle sono relativi alle seguenti grandezze (calcolate secondo quanto esposto dalle normative precedentemente esaminate):

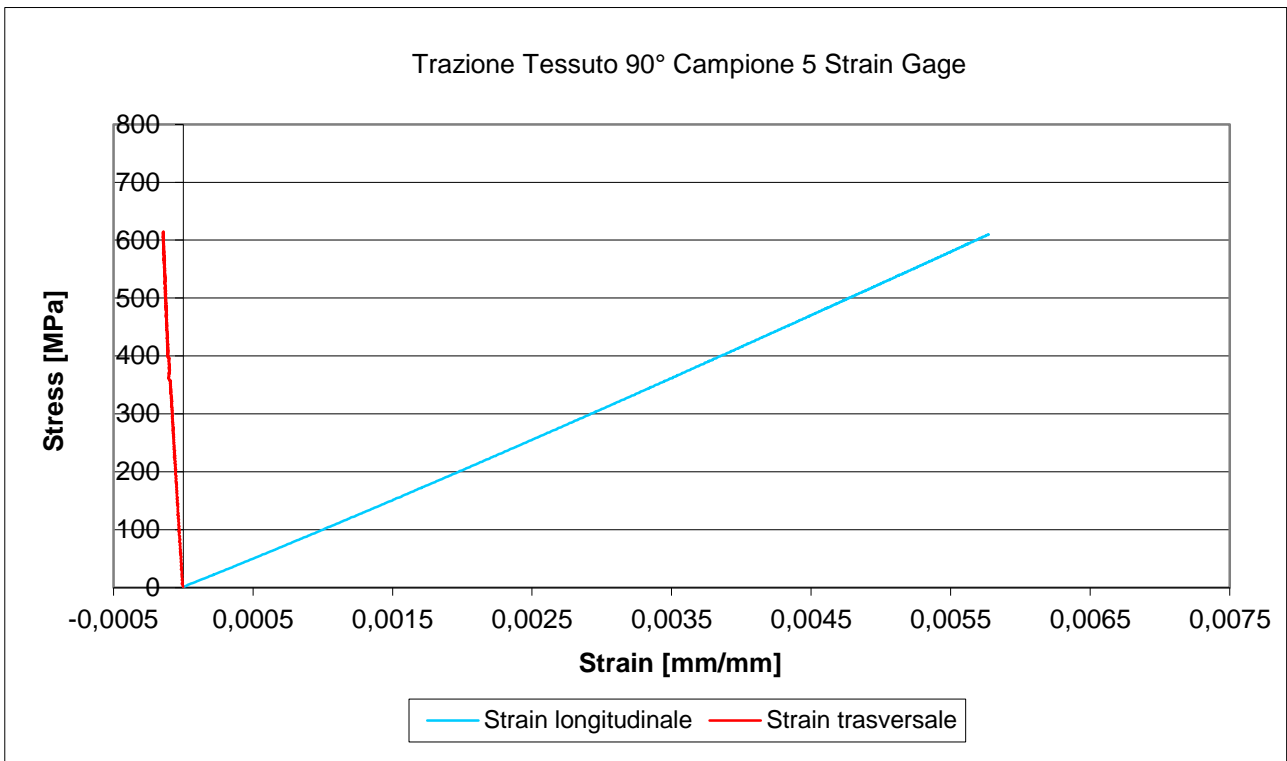
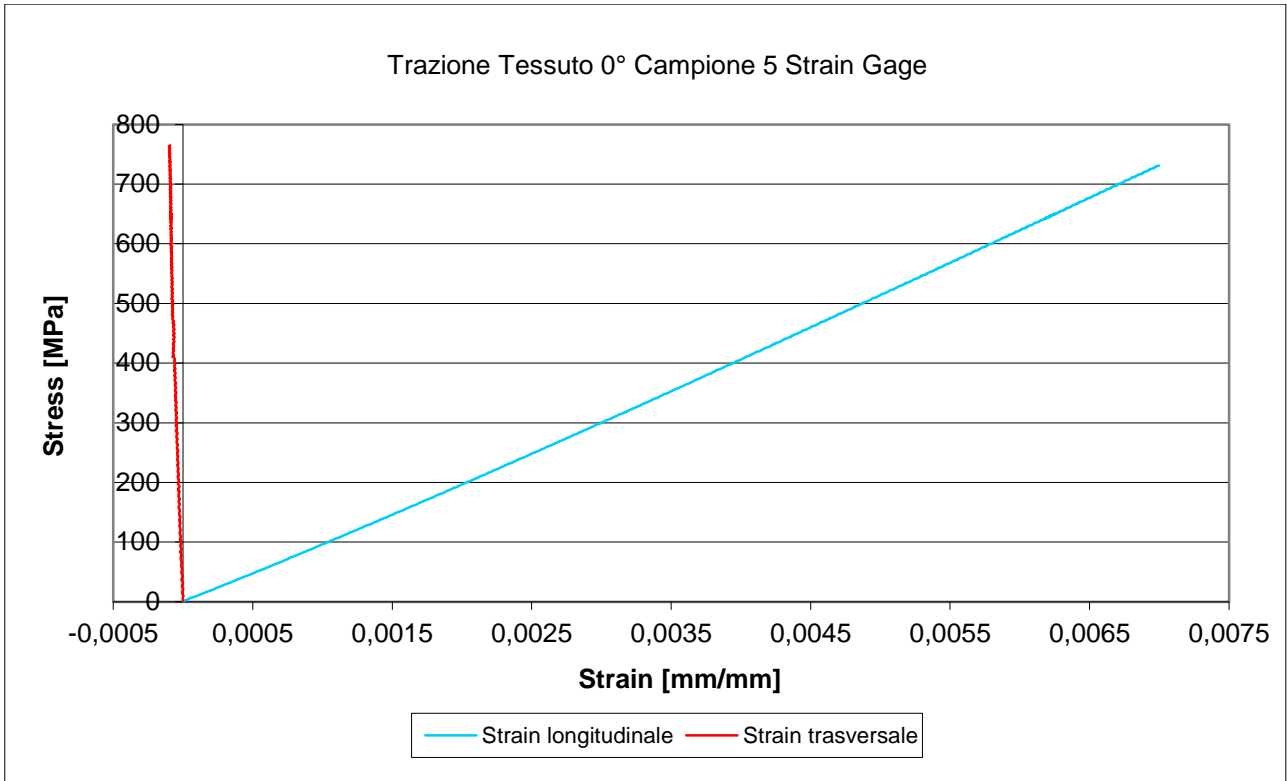
- F^{tu} = carico di rottura in MPa.
- E_{Ext}^{chord} = modulo elastico longitudinale misurato dall'estensometro in GPa.
- E_{Sg}^{chord} = modulo elastico longitudinale misurato dall'estensimetro in GPa.
- $\Delta E\%$ = errore percentuale tra E_{Ext}^{chord} ed E_{Sg}^{chord} .
- ν = coefficiente di Poisson.
- τ_{12}^m = sforzo di taglio massimo in MPa.
- G_{12} = modulo di elasticità tangenziale piano in GPa.
- Modalità di rottura.

Nelle Figure da 5.6a a 5.6d e da 5.10a a 5.10c si riportano a titolo di esempio alcuni diagrammi relativi alle prove effettuate.

Nelle Figure da 5.7 a 5.9 e da 5.11 a 5.12 si riportano invece le foto dei campioni rotti dopo le prove.

Tabella 5.6, risultati delle prove di trazione per i provini in tessuto.

Materiale	Campione	F^{tu} [MPa]	E_{Ext}^{chord} [GPa]	E_{Sg}^{chord} [GPa]	$\Delta E\%$	ν	τ_{12}^m [MPa]	G_{12} [GPa]	Modalità rottura
Tessuto 0°	1	737.97	114.91						LMV
	2	728.68	107.05						LAV
	3	739.96	110.99						LAV
	4	657.38	109.38	103.77	5.13	0.05			LMV
	5	770.53	109.31	102.12	6.58	0.02			LMV
	6	606.53	109.67	104.63	4.60	0.02			LMV
Media		706.84	110.22	103.51	6.09	0.03			Nota: M = A+W
Std. Deviation		61.82	2.62	1.27		0.02			
Std. Deviation %		8.75	2.38	1.23		58.1			
Tessuto 90°	1	674.94	103.7						LAV
	2	610.47	102.25						LAV
	3	661.29	103.99						LMV
	4	554.38	99.1	105.79	-6.74	0.01			LAV
	5	614.61	104.49	104.24	0.24	0.03			LAB
	6	605.03	103.96	103.38	0.55	0.02			LAV
Media		620.12	102.92	104.47	-1.51	0.02			Nota: M = A+W
Std. Deviation		43.3	2.02	1.22		0.01			
Std. Deviation %		6.98	1.96	1.17		31.6			
Tessuto ±45°	1	126.74	11.50	11.83	-2.85	0.86	56.51	3.35	MGM
	2	126.80	11.53	12.20	-5.87	0.86	56.77	3.50	MGM
	3	125.28	11.76	11.91	-1.24	0.88	55.73	3.37	MGM
	4	126.02	10.74	12.21	-13.64	0.88	56.48	3.47	MGM
	5	123.93	11.41	12.30	-7.81	0.89	55.51	3.49	MGM
	6	126.59	11.71	12.68	-8.25	0.91	57.31	3.56	MGM
Media		125.89	11.44	12.19	-6.51	0.88	56.39	3.45	Nota: la prima lettera M = A+D+X
Std. Deviation		1.12	0.37	0.3		0.02	0.67	0.08	
Std. Deviation %		0.89	3.22	2.5		2.24	1.18	2.36	



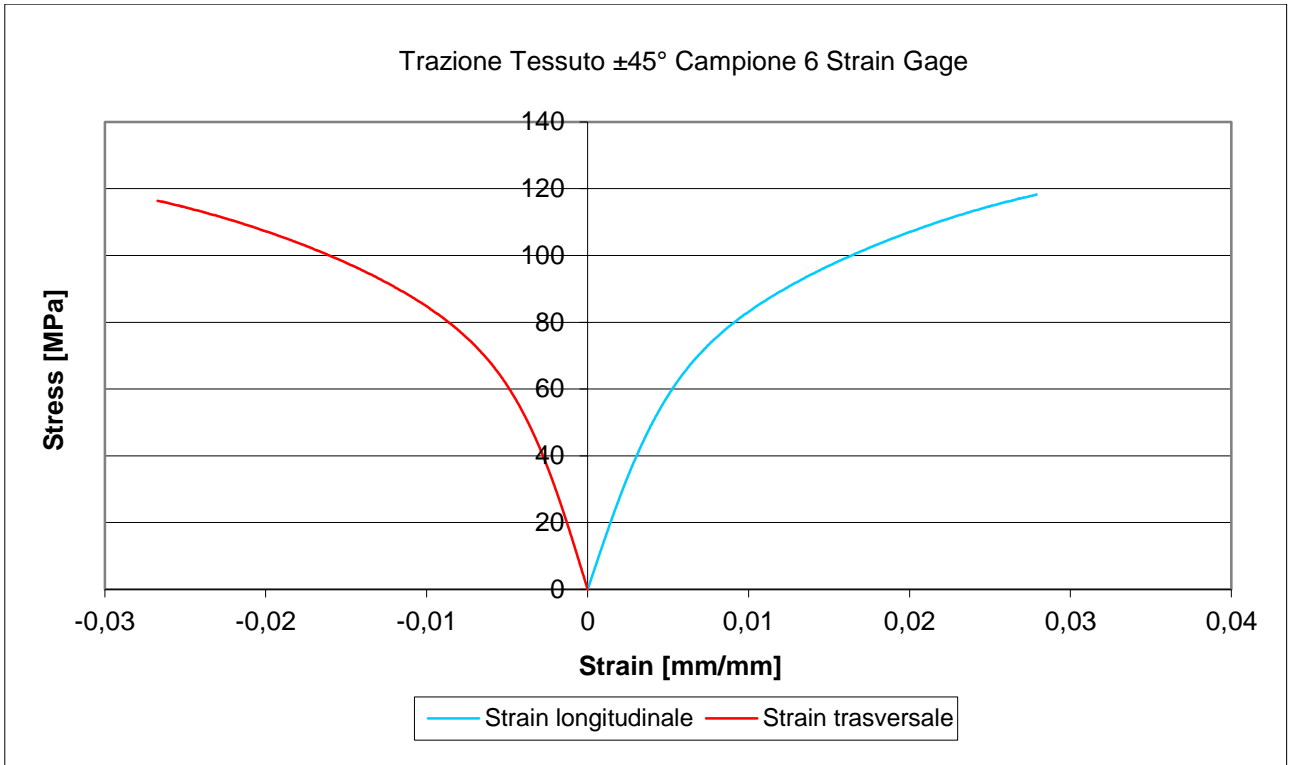


Figura 5.6c

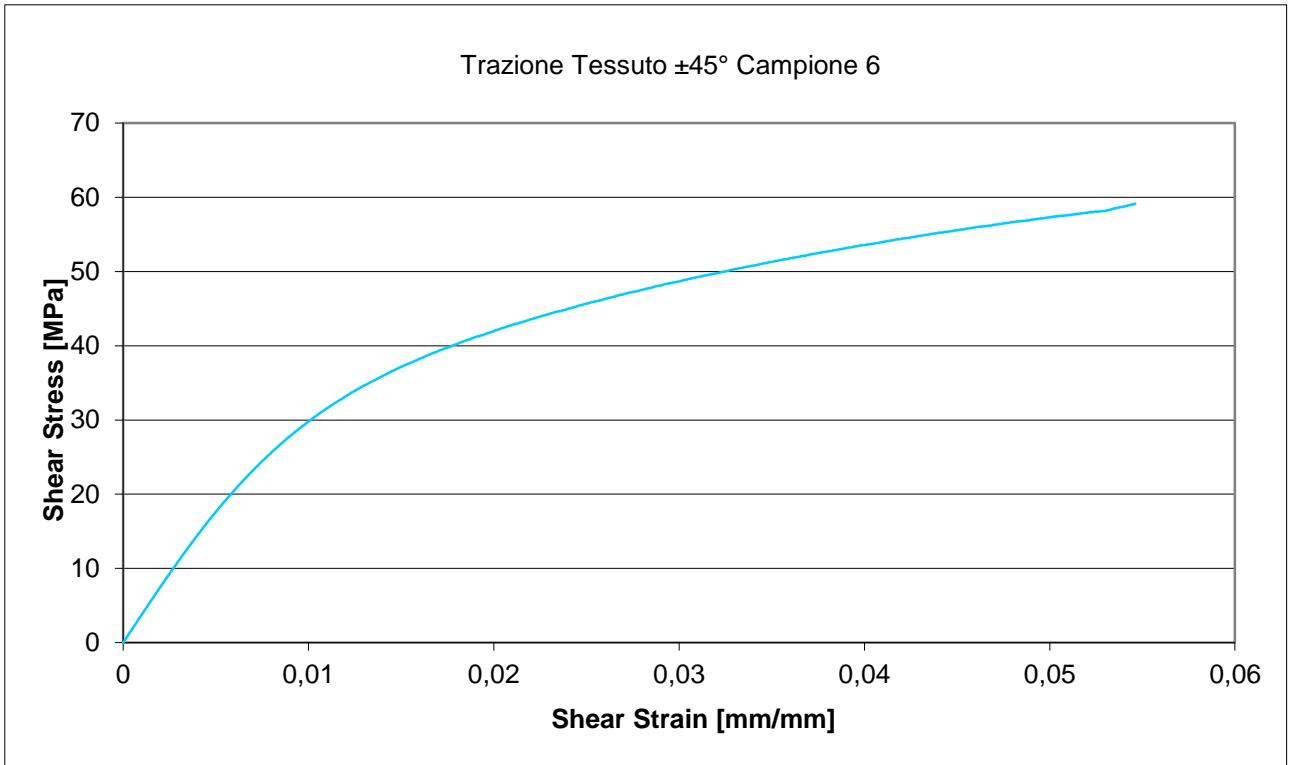


Figura 5.6d



Figura 5.7, provini di Tessuto 0° rotti.

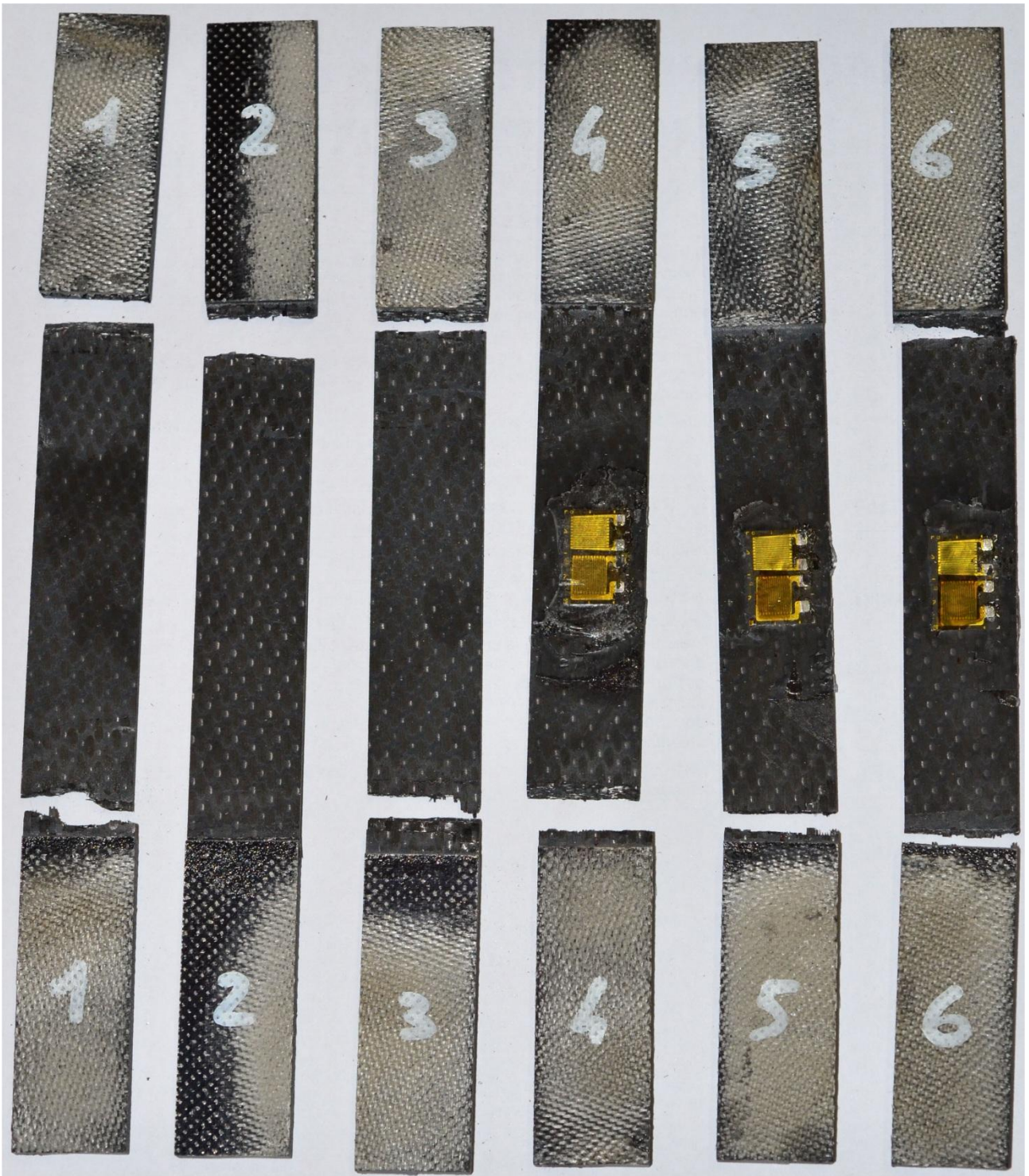


Figura 5.8, provini di Tessuto 90° rotti.



Figura 5.9, provini di Tessuto $\pm 45^\circ$ rotti.

Tabella 5.7, risultati delle prove di trazione per i provini in unidirezionale.

Materiale	Campione	F^{tu} [MPa]	E_{Ext}^{chord} [GPa]	E_{Sg}^{chord} [GPa]	$\Delta E\%$	ν	τ_{12}^m [MPa]	G_{12} [GPa]	Modalità rottura
Unidirezionale 0°	1	1629.06	213.22						SMV
	2	1655.77	210.45						SMV
	3	1443.40	176.24						SAV
	4	1708.19	209.28	215.92	-3.17	0.32			SMV
	5	1667.43	197.12	206.43	-4.72	0.10			SMV
	6	1624.97	211.02	210.09	0.44	0.32			SMV
Media		1621.47	202.89	210.82	-3.91	0.32			
Std. Deviation		92.29	14.24	4.79		0.01			
Std. Deviation %		5.69	7.02	2.27		1.63			
Unidirezionale ±45°	1	156.87	10.78	11.08	-2.84	0.90	50.87	3.00	MGT
	2	157.34	10.81	11.46	-6.07	0.95	50.50	3.26	MGT
	3	153.02	11.00	11.88	-8.00	0.96	50.73	3.43	MGB
	4	153.47	10.78	12.10	-12.24	1.00	50.55	3.33	MGM
	5	155.64	11.18	11.09	0.78	0.93	49.70	2.94	MGM
	6	152.93	11.13	11.41	-2.50	0.93	50.69	3.08	MGM
Media		154.88	10.94	11.5	-5.1	0.93	50.51	3.17	
Std. Deviation		1.99	0.18	0.41		0.02	0.42	0.19	
Std. Deviation %		1.29	1.66	3.59		2.61	0.83	6.13	

NOTA: nel materiale Unidirezionale 0°, Campione 5, si è deciso di non tener conto ai fini del calcolo della media del valore del coefficiente di Poisson per via di un problema con lo strain gage trasversale, il cui andamento del grafico sforzo-deformazione presenta un leggero andamento non lineare nella parte iniziale compresa tra 0 e 200 MPa. Un'anomalia è stata riscontrata nell'Unidirezionale ±45°, Campione 4, sempre per quanto riguarda il valore del modulo di Poisson e pertanto anche in questo caso non si è tenuto conto di tale valori ai fini del calcolo della media.

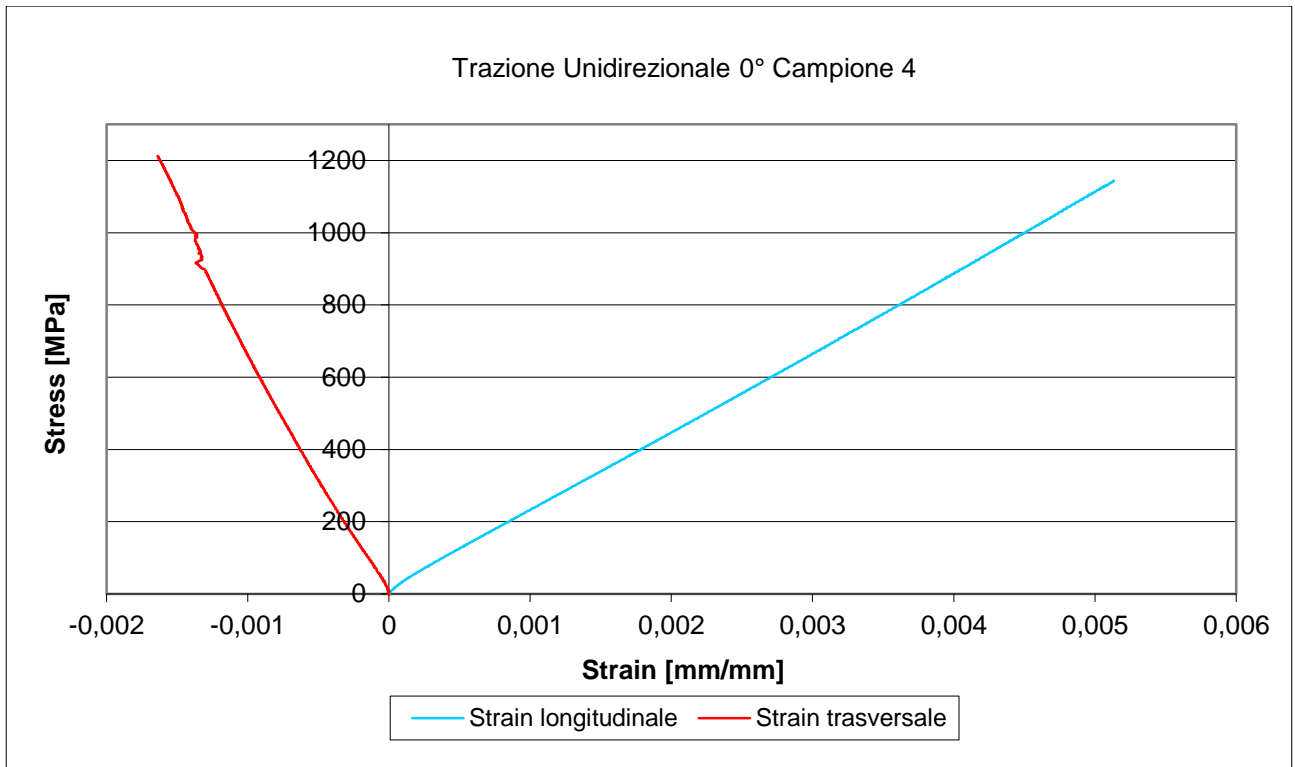


Figura 5.10a

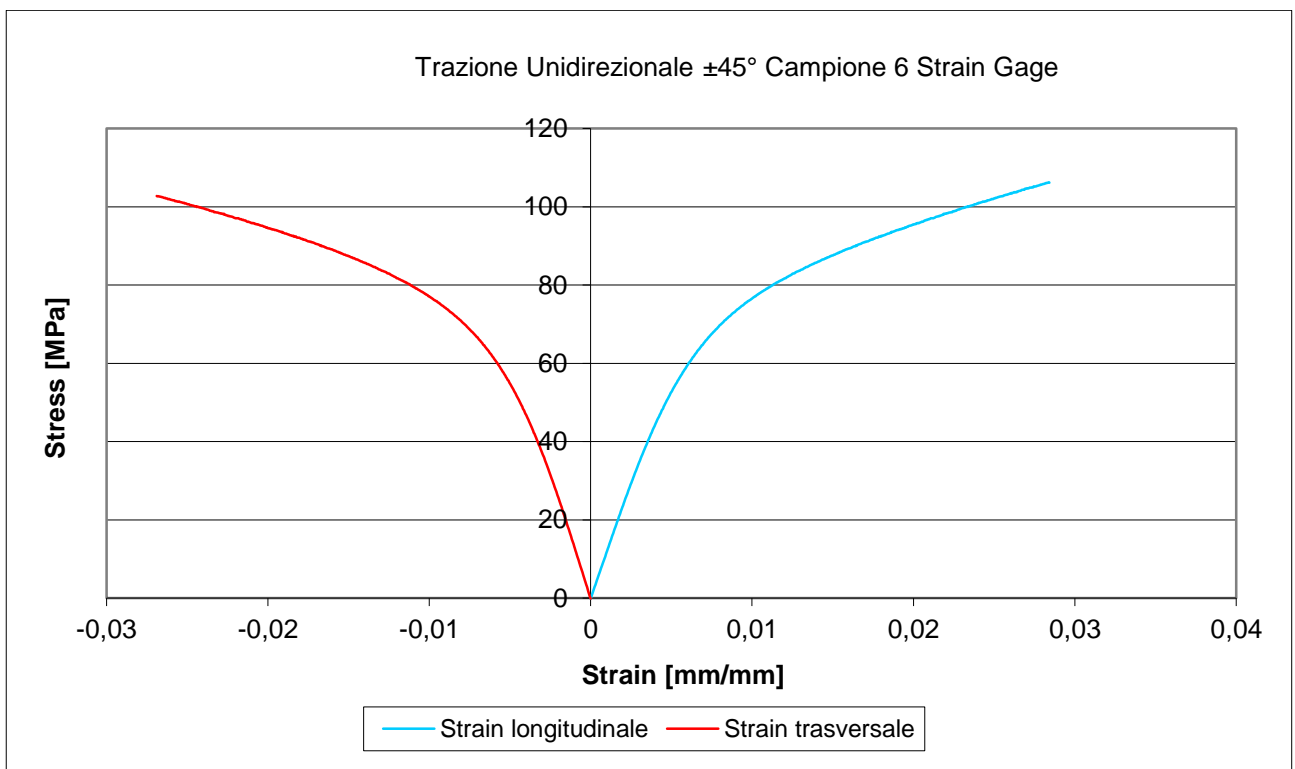


Figura 5.10b

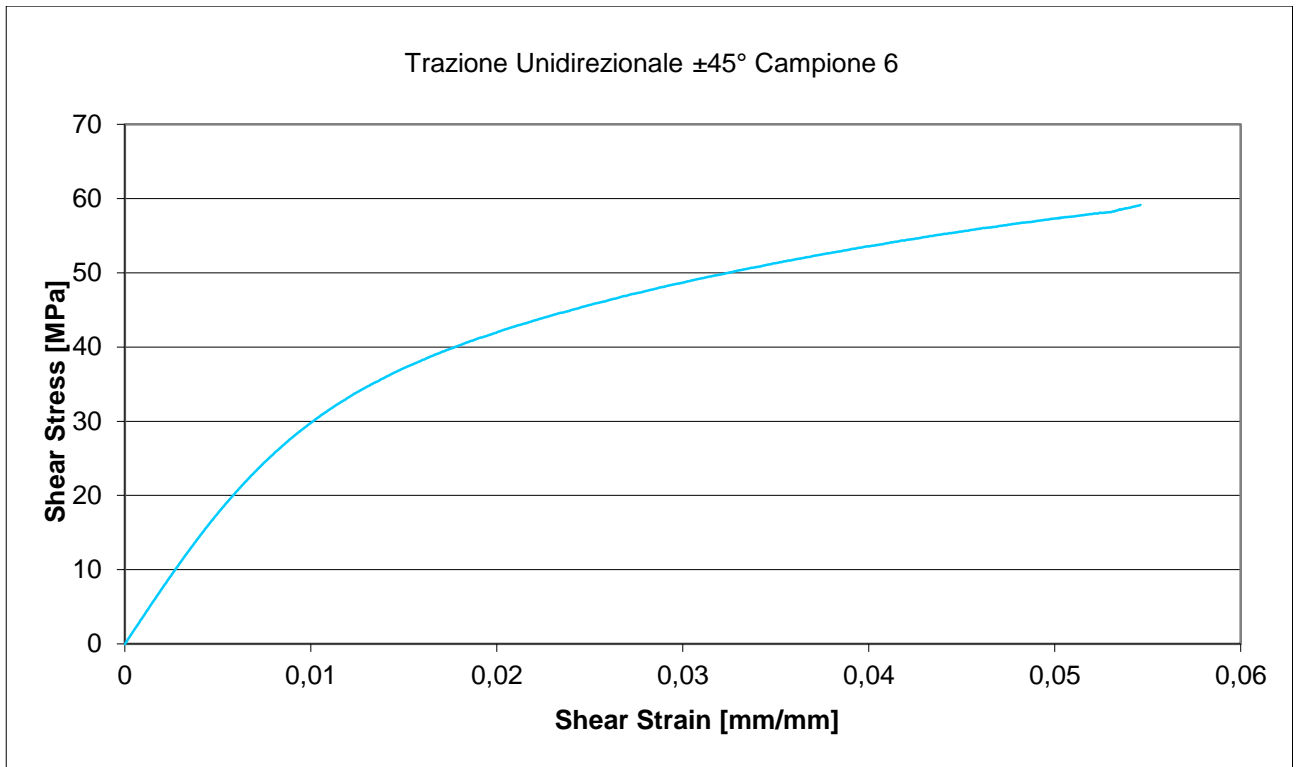


Figura 5.10c

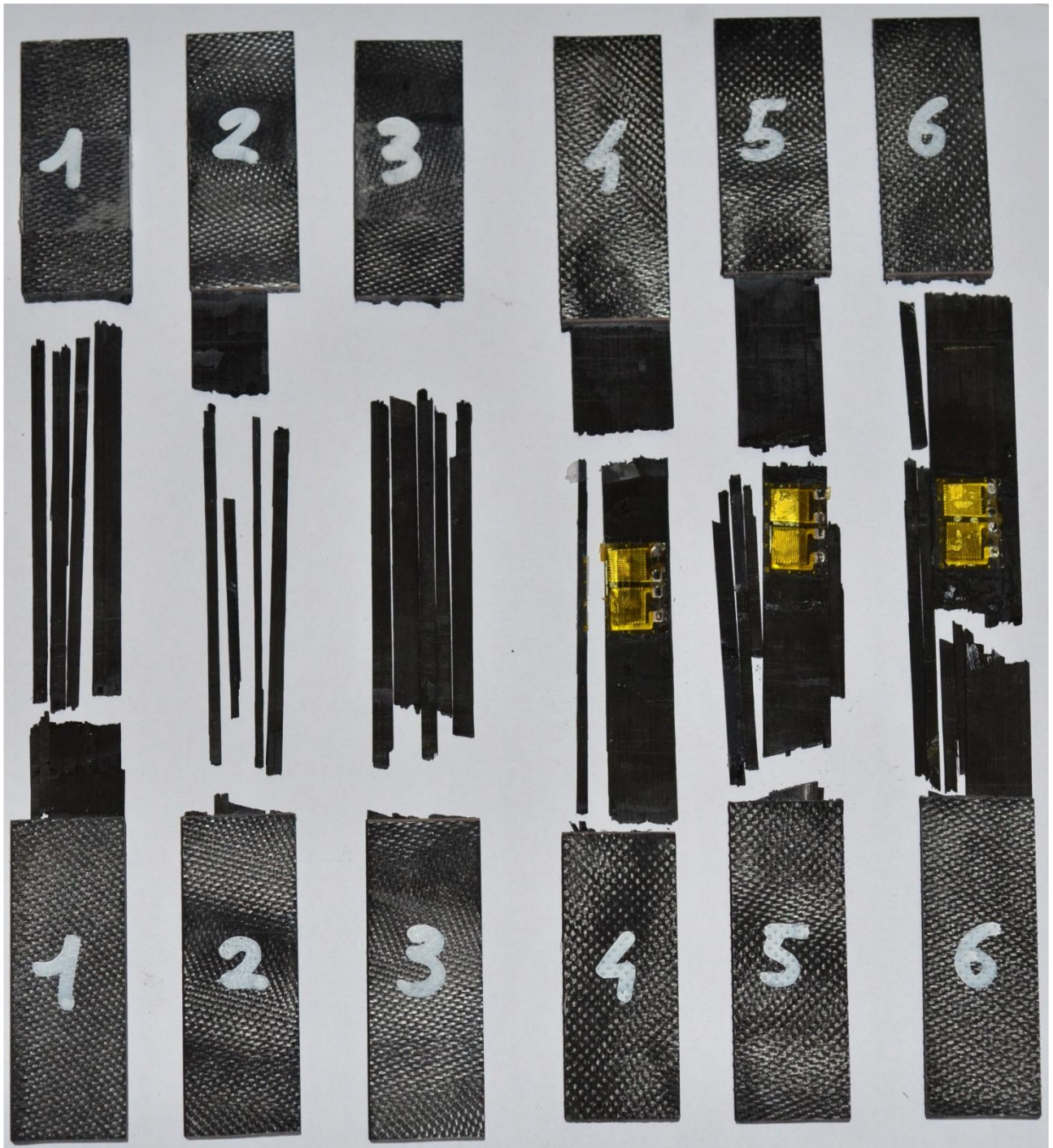


Figura 5.11, provini di Unidirezionale 0° rotti.

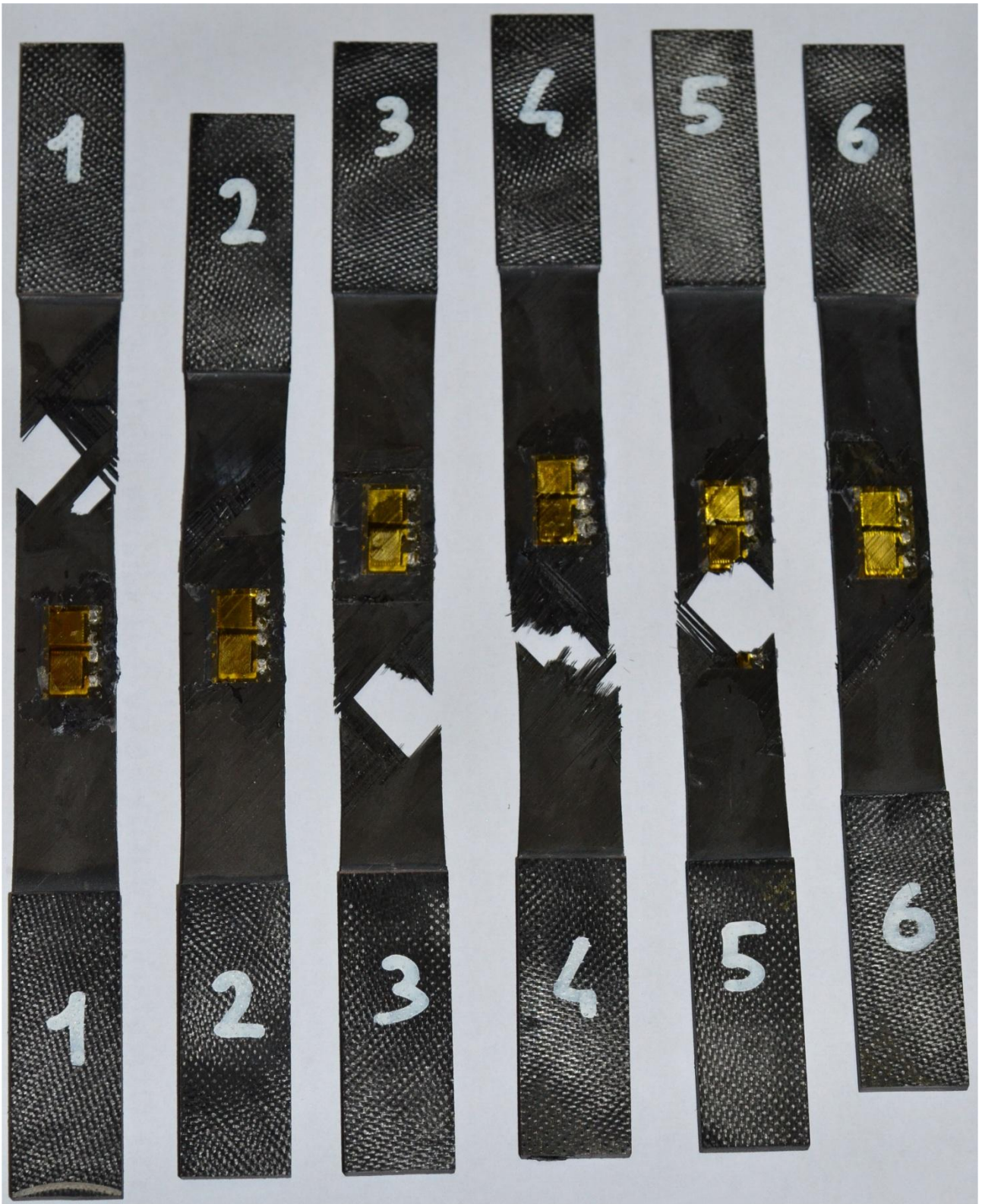


Figura 5.12, provini di Unidirezionale $\pm 45^\circ$ rotti.

6 Conclusioni

I risultati delle prove eseguite mettono in evidenza il diverso comportamento dei compositi tessuti dagli unidirezionali. Le considerazioni fatte di seguito fanno riferimento al valore medio di ciascuna proprietà misurata (Tabella 5.8).

Tabella 5.8

Materiale	F^{tu} [MPa]	E_{Ext}^{chord} [GPa]	E_{Sg}^{chord} [GPa]	$\Delta E\%$	ν	$\tau_{12\ max}$ [MPa]	G_{12} [GPa]
Tessuto 0°							
Media	706.84	110.22	103.51	6.09	0.03		
Std. Deviation	61.82	2.62	1.27		0.02		
Std. Deviation %	8.8	2.4	1.2		58.1		
Tessuto 90°							
Media	620.12	102.92	104.47	-1.51	0.02		
Std. Deviation	43.3	2.02	1.22		0.01		
Std. Deviation %	7.0	2.0	1.2		31.6		
Tessuto ±45°							
Media	125.89	11.44	12.19	-6.51	0.88	56.39	3.45
Std. Deviation	1.12	0.37	0.30		0.02	0.67	0.08
Std. Deviation %	0.9	3.2	2.5		2.2	1.2	2.4
Unidirezionale 0°							
Media	1621.47	202.89	210.82	-3.91	0.32		
Std. Deviation	92.29	14.24	4.79		0.01		
Std. Deviation %	5.7	7.0	2.3		1.6		
Unidirezionale ±45°							
Media	154.88	10.94	11.5	-5.1	0.93	50.51	3.17
Std. Deviation	1.99	0.18	0.41		0.02	0.42	0.19
Std. Deviation %	1.3	1.7	3.6		2.6	0.8	6.1

Partendo da un confronto fra i materiali disposti a 0°, per quanto riguarda sia la resistenza sia il modulo elastico, registriamo i valori più alti tra le prove eseguite.

Il Tessuto 0° sopporta tensioni fino a 707 MPa e presenta un modulo elastico pari a 110 GPa, mentre l'Unidirezionale 0° presenta una resistenza di 1621 MPa ed un modulo elastico di 203 GPa. Tali risultati sono in linea con le attese visto che il Tessuto ha una percentuale di fibre orientate nella direzione della trazione inferiore a quelle dell'Unidirezionale, oltre ad avere una maggior deformabilità, per il fatto che le fibre sono curvate durante il processo di tessitura.

Tuttavia il Tessuto presenta l'indubbio vantaggio di possedere due direzioni ad elevata rigidità, come evidenziato anche dai valori del modulo elastico del Tessuto 90° .

L'Unidirezionale 0° , presenta un coefficiente di Poisson di 0,32 (simile a quello dei materiali isotropi metallici) mentre quello relativo al Tessuto ha un valore più contenuto pari a 0,03. Tale differenza è dovuta al fatto che, sollecitando il Tessuto in una delle due direzioni su cui sono disposte le fibre, quelle presenti nell'altra direzione si oppongono alla contrazione con la loro elevata rigidità. Per questo motivo le deformazioni trasversali sono di entità limitata (sia per il Tessuto 0° che 90°).

Prendendo in esame i risultati del Tessuto 90° , si registrano valori di 620 MPa per la tensione di rottura, di 103 GPa per il modulo di elasticità e di 0,02 per il coefficiente di Poisson. Questi valori sono simili al corrispondente Tessuto 0° e certamente migliori rispetto all'ipotetico unidirezionale con orientamento a 90° . Questo perché in un tessuto a 90° si ha comunque un sufficiente numero di fibre nella direzione di prova, mentre in un unidirezionale a 90° l'elemento di tenuta è costituito praticamente solo dalla resina.

Passando infine ad un confronto tra i materiali disposti a $\pm 45^\circ$, si nota come questi compositi hanno la resistenza minore, tuttavia sono quelli che sopportano le deformazioni maggiori (vedi diagrammi esposti nel Capitolo 5).

In particolare il Tessuto $\pm 45^\circ$ è il materiale che in assoluto fa registrare le tensioni di trazione minori, pari a 126 MPa, tuttavia rispetto all'Unidirezionale ha un maggior modulo di elasticità longitudinale pari a 11 GPa. Il coefficiente di Poisson pur non raggiungendo il valore dell'Unidirezionale si presenta comunque elevato, con un valore di 0,88. Per quanto riguarda le proprietà al taglio del tessuto, si registrano valori maggiori rispetto all'Unidirezionale, con sforzi di taglio che raggiungono i 56 MPa e un valore del modulo di elasticità tangenziale di 3,5 GPa.

L'Unidirezionale $\pm 45^\circ$ sopporta tensioni maggiori rispetto al Tessuto, pari a 155 MPa, e deformazioni maggiori (oltre 30000 $\mu\epsilon$). Si registra,

inoltre, il valore del coefficiente di Poisson più alto in assoluto, pari a 0,94. Il comportamento a taglio si presenta, con valori della resistenza e del modulo di elasticità tangenziale rispettivamente di 51 MPa e 3,0 GPa.

Per quanto riguarda la bontà delle misurazioni, eccezion fatta per i due provini riportati nella Nota allegata alla Tabella 5.7, si evince come queste siano di buona qualità, con deviazioni standard percentuali ridotte e comunque sempre inferiori al 9% (tranne che per i valori più bassi del coefficiente di Poisson, dove la variazione percentuale è maggiore). Prendendo in considerazione in particolare le misure di deformazione, si riscontra un buon accordo tra i valori del modulo di Young, misurati mediante estensometro rispetto a quelli misurati con strain gauge ($\Delta E\% \leq 6,5\%$). Ciò è indice di una corretta calibrazione, di un buon posizionamento ed incollaggio degli apparati di misurazione (strain gauge ed estensometro).

Volendo operare un confronto tra i compositi a 0° presi in esame ed alcuni materiali metallici (vedi Tabella 5.9) generalmente impiegati nell'industria automobilistica, le prestazioni a trazione offerte da questi compositi risultano nettamente vantaggiose, soprattutto considerando il peso ridotto che li caratterizza.

Tabella 5.9

Materiale	Carico rottura F^{tu} [MPa]	$\frac{F^{tu}}{\gamma}$ [Km]	Modulo elastico E [GPa]	$\frac{E}{\gamma}$ [Mm]	Coeff. Poisson	Peso specifico γ [KN/m ³]
Unidirez. 0°	1621	>81,00	203	>10	0,25	<20
Tessuto 0°	706	>35,00	110	>5,5	0,03	<20
Acciaio	2000	21,11	207	2,70	0,27-0,30	76,6
Titanio	1500	32,54	115	2,50	0,34	46,1
Alluminio	500	19,01	73	2,77	0,33	26,3
Magnesio	170	9,77	44	2,52	0,35	17,4

Risulta evidente quindi come il loro impiego nel settore delle competizioni automobilistiche possa presentarsi molto favorevole, portando alla realizzazione di strutture dalle prestazioni maggiori rispetto ad un analogo componente metallico e dal peso più contenuto, operando quindi un miglioramento delle performance finali del veicolo, nonché ad un risparmio sui consumi. Per quanto riguarda un impiego più vasto, relativo alla produzione di massa, l'utilizzo dei compositi polimerici a fibra di carbonio rimane ancora piuttosto contenuto per via dei costi e dei tempi di realizzazione ancora troppo elevati per giustificarne l'adozione; se ne fa uso solamente su dettagli dei modelli sportivi di punta e per le supercar.

7 Simboli

Simbolo	Unità di misura	Definizione
A	mm^2	Area sezione trasversale provino
α	$^{\circ}\text{C}^{-1}$	Coefficiente di dilatazione termica
c	J/KgK	Calore specifico
CV	-	Coefficiente di variazione statistica
E	GPa	Modulo di elasticità longitudinale
ε_x	$\mu\varepsilon$	Deformazione longitudinale
ε_y	$\mu\varepsilon$	Deformazione trasversale
F^{tu}	MPa	Carico di rottura
γ	N/m^3	Peso specifico
γ_{xy}	$\mu\varepsilon$	Deformazione di taglio
G	GPa	Modulo di elasticità trasversale
h	mm	Spessore
λ	W/mK	Conduttività termica
M_f	-	Rapporto fibre su massa totale
M_m	-	Rapporto matrice su massa totale
m_{of}	Kg/m^2	Massa di fibra per area
n	-	Numero di campioni
P^{max}	N	Forza massima prima della rottura
ρ	Kg/m^3	Massa specifica
ρ_f	Kg/m^3	Densità fibra
s_{n-1}	-	Deviazione standard
σ	MPa	Sollecitazione normale
τ_{12}	MPa	Sollecitazione di taglio
ν	-	Coefficiente di Poisson
V_f	-	Rapporto fibre su volume totale
V_m	-	Rapporto matrice su volume totale
w	mm	Larghezza
\bar{x}	-	Media di una data proprietà

8 Bibliografia

- Daniel Gay, Suong V. Hoa e Stephen W. Tsai: Composite Materials Design and Applications, CRC Press LLC.
- Robert M. Jones: Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor & Francis.
- J. W. Dally e W. F. Riley: Experimental Stress Analysis, McGraw-hill Book company, N.Y.
- K. Hoffmann: An Introduction to Measurements using strain gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt.