

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
(DTG)

Corso di laurea Magistrale in Ingegneria dell'innovazione
del prodotto

Titolo:

**Sviluppo di metodologie innovative per il
monitoraggio strutturale di compositi in fibra di vetro**

Relatore: Prof. Michele Zappalorto

Correlatore: Ing. Lucio Maragoni

Laureando:

Stefano Agnolin

N° Matr. 1160063

Anno accademico 2018/2019

Abstract

Studio dei metodi di monitoraggio dell'integrità strutturale (SHM) per materiali compositi fibro-rinforzati (FRP) con metodi di indagine piezoresistivi o capacitivi per applicazioni sul campo, applicabili anche su strutture già esistenti (1D). Caratterizzazione di un sensore piezoresistivo costituito da bundle in fibra di carbonio applicati su di un laminato in fibra di vetro. La correlazione tra la perdita di modulo elastico e la resistenza elettrica all'aumentare del numero di cicli a fatica risulta possibile. Tentativo di produzione di un tubo in fibra di vetro su cui è applicato il sensore in fibra di carbonio. La deposizione del bundle risulta possibile, mentre la fabbricazione del tubo deve essere riprogettata per ottenere una finitura liscia e un *demolding* più semplice.

Abbreviazioni e simboli

Parola o simbolo	Significato
Peel-ply	Film di plastica distaccante utilizzato per la produzione di materiali compositi
SHM	Structural health monitoring
FGRP	Fibre glass reinforced polymer
Laminato	Sovrapposizione di singole lamine di materiale composito
Lay-up	Processo di sovrapposizione delle singola lamine per ottenere un laminato.
Pre-preg	Tessuto pre-impregnato
UD	Unidirezionale
GF	Gauge Factor, sensibilità di un sensore piezoresistivo
FE	“Finite elements” – eng.
Direzione 1	Direzione parallela alle fibre di un materiale composito a fibre lunghe
Direzione 2	Direzione perpendicolare alle fibre di un materiale composito a fibre lunghe
Direzione 3	Direzione perpendicolare a 1 e 2
Estensimetro	Misuratore di deformazione di un materiale
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
σ	Tensione normale
τ	Tensione tangenziale
COMPENDEX	COMPUterized ENgineering INDEX
Scopus	Motore di ricerca per articoli scientifici
Faston	Connettore rapido a pressione solitamente utilizzato per connettere i capi di due fili conduttori di elettricità
Source Meter	Apparecchiatura digitale in grado di generare tensione e corrente costante e acquisire segnali di tensione e corrente.
Ef	Modulo di elasticità delle fibre
Em	Modulo di elasticità della matrice

Indice

Abstract	1
Abbreviazioni e simboli	5
Introduzione.....	9
CAPITOLO 1	15
Le tecniche di l'indagine per l'integrità strutturale	15
Radiografie.....	16
Ultrasuoni.....	17
Termografie.....	18
CAPITOLO 2	19
Ricerca nella letteratura scientifica	19
Metodi piezoresistivi (1D).....	20
Metodi Capacitivi (1D).....	25
Metodi Ultrasonici (1D).....	30
Metodi piezoresistivi (2D).....	32
Conclusioni	36
CAPITOLO 3	37
Laminato GFRP [0/90 ₂] _s con bundle in fibra di carbonio.....	37
Analisi sperimentale preventiva	40
Prova sperimentale: flessione a 3 punti	42
Calcolo del GF in flessione a 3 punti	44
Validazione dei risultati ottenuti da Ansys attraverso prove sperimentali	50
Prova sperimentale: trazione	52
Conclusioni: prova di flessione a 3 punti e prova di trazione.....	53

CAPITOLO 4	55
Laminato GFRP [0/90 ₂] _s con griglia in fibra di carbonio	55
Prove di fatica	60
Prova di fatica fino a 29000 cicli	63
Prova di fatica fino a 113000 cicli	64
Prova di fatica fino a 738000 cicli	65
Prova di fatica fino a 382000 cicli	70
Confronto tra i provini G1, G2 e G3	72
Correlazione tra E_x/E_{x_0} e il rapporto R/R_0	76
 CAPITOLO 5	 77
Tubo in fibra di vetro [0,90 ₂] _s con bundle in fibra di carbonio.....	77
 Conclusioni finali.....	 81
Bibliografia.....	83

Introduzione

Negli ultimi decenni la ricerca scientifica ha ricevuto una forte spinta per realizzare, testare e impiegare nuovi materiali in grado di soddisfare le prestazioni meccaniche richieste, in primis, dal settore aeronautico, dal mondo eolico, dal mondo dell'ingegneria civile e da quello sportivo. La richiesta, in aumento, di prestazioni sempre migliori in termini di riduzione del peso, rigidità e altre caratteristiche specifiche ha spinto questi settori a prendere in considerazione l'utilizzo di materiali compositi: questi hanno la caratteristica di poter essere realizzati *ad hoc*, in base all'applicazione specifica e alle caratteristiche richieste.

La tendenza ad utilizzare questi nuovi materiali è da ricercarsi soprattutto nella richiesta di migliori prestazioni che acciaio, alluminio e magnesio non sono in grado di offrire; inoltre la continua diminuzione dei prezzi delle fibre di rinforzo e delle matrici polimeriche rendono i materiali compositi più appetibili alle industrie e alle applicazioni civili.

Se si ricerca nelle banche dati brevettuali il numero annuo di brevetti depositati nel cui titolo si menzionano le parole “*weight reduction*”, “*composite material*”, “*carbon fibre*” o “*glass fibre*”, è subito chiaro un trend in salita, espressione di un forte interesse da parte delle aziende, università o singole persone di spingere la ricerca verso soluzioni “*lightweight*” e possibilmente in materiale composito (Figura 1).

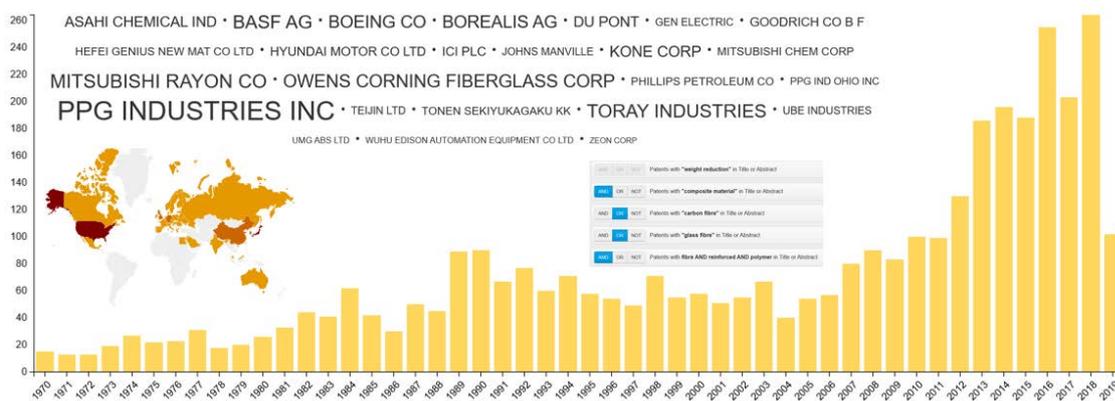


Figura 1 Numero di brevetti nel cui nome compaiono le parole “*weight reduction*”, “*composite material*”, “*carbon fibre*” o “*glass fibre*” dal 1970 al 2019. In alto: nomi delle industrie detentrici dei brevetti; a sinistra localizzazione nel mondo dei brevetti. Fonte: www.patentInspiration.com.

Scavando più a fondo nella ricerca brevettuale è possibile notare che i brevetti depositati con “*structural health monitoring*” e “*composite material*” sono anch’essi in crescita, ma solo in anni recenti (Figura 2).

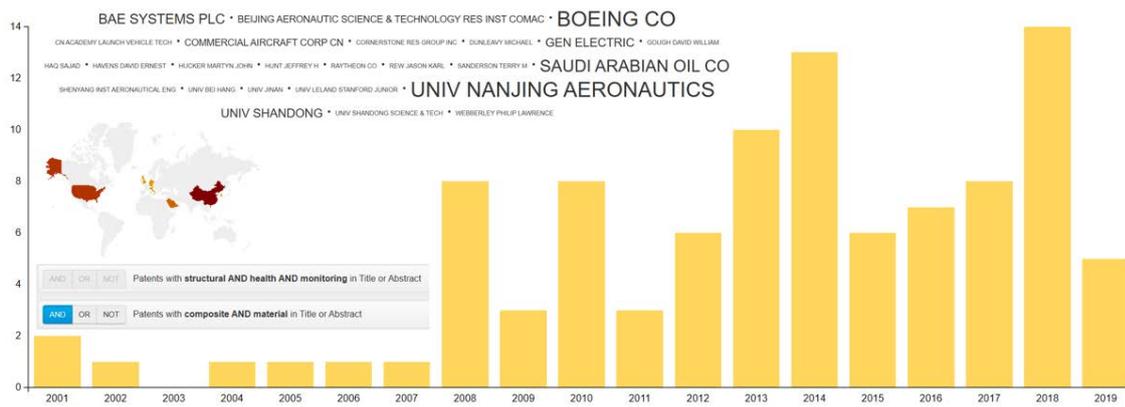


Figura 2 Numero di brevetti nel cui nome compaiono le parole “structural health monitoring” e “composite material” dal 2001 al 2019. Sopra troviamo i nomi delle industrie che hanno brevettato e a sinistra si mostra la localizzazione del mondo di questi brevetti. Fonte: www.patentinspiration.com.

Al momento Cina e USA si contendono il primato per numero di brevetti registrati nell’ambito del monitoraggio dell’integrità strutturale per materiali compositi; in Italia invece è stato depositato un solo brevetto che si riferisce ad un materiale composito con capacità di sopportare carichi e che funge esso stesso da sensore per monitorare l’integrità strutturale. Nell’abstract del brevetto troviamo la seguente descrizione del sensore:

“[...] The invention supplies the opportunity of unifying in a unique body the ability of describing the structure damage and/or stress/strain state and the ability of bearing applied loads; it can be integrated in and/or integral with the structure which is to be monitored. The invention is realized by a composite material (A) in which an electrical conductor is embedded (B). Said electrical conductor is the sensing part of the invention, and it is electrically connected to an electronic circuit, also embedded in the invention [...]”¹.

Per stabilire quale sia la tecnologia più utilizzata per il monitoraggio strutturale si è aggiunta nei filtri di ricerca la parola “embedded”, ovvero “inserire all’interno” o, in senso più ampio, “unire” (vedi CAPITOLO 2). I 98 brevetti della ricerca precedente si riducono a 26, 10 dei quali sono stati depositati da Boeing Co. e i restanti da università o singoli individui (Figura 3). Anche i brevetti appartenenti all’azienda Boeing Co. fanno riferimento ad un sistema di tipo “embedded”, anche se in questo caso è specificato che si tratta di una fibra ottica.

¹ [15]

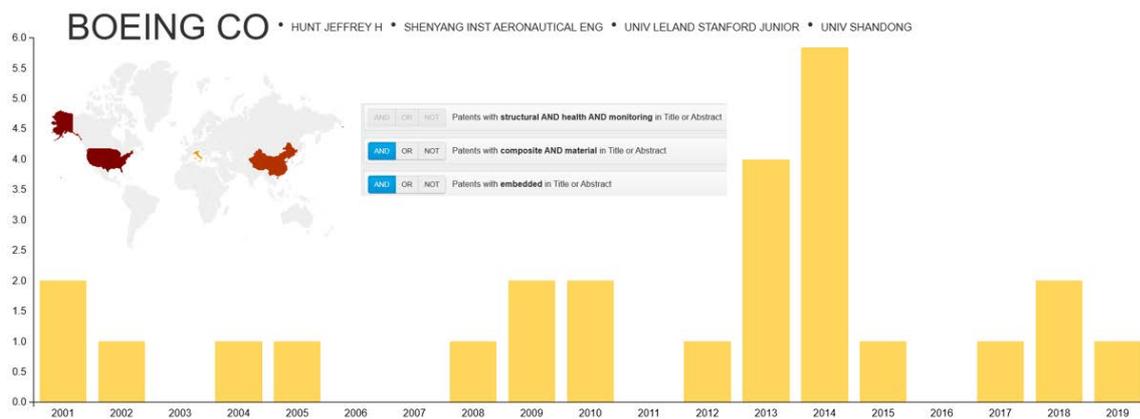


Figura 3 Numero di brevetti nel cui nome compaiono le parole "structural health monitoring" e "composite material" e "embedded" dal 2001 al 2019. Sopra troviamo i nomi delle industrie che hanno brevettato e a sinistra si mostra la localizzazione del mondo di questi brevetti. Fonte: www.patentinspiration.com.

<input type="checkbox"/> JP2014052368A	Composite structure having embedded sensing system	20 Mar 2014	BOEING CO
<input type="checkbox"/> CN103575740A	Composite structure having an embedded sensing system	12 Feb 2014	BOEING CO
<input type="checkbox"/> KR20140016807A	Composite structure having an embedded sensing system	10 Feb 2014	BOEING CO
<input type="checkbox"/> EP2693187A2	Composite structure having an embedded sensing system	5 Feb 2014	BOEING CO
<input type="checkbox"/> CA2815788A1	Composite structure having an embedded sensing system	31 Jan 2014	BOEING CO
<input type="checkbox"/> JP2013064729A	Composite structure having embedded detection system	11 Apr 2013	BOEING CO

Figura 5 Brevetti depositati dall'azienda Boeing co. Fonte: www.patentinspiration.com.

Le aziende produttrici di materie prime (fibre e matrici) si sono mosse di conseguenza, inseguendo il trend dato dalle aziende, che in primis progettano e utilizzano materiali compositi, e dalla ricerca scientifica. La figura successiva mostra il numero di brevetti depositati nelle banche brevettuali mondiali nel cui titolo ci siano le parole "fibre reinforced polymer"; dalla mappa geografica è possibile notare che i brevetti sono stati depositati in quantità maggiore da aziende con sede negli USA (Figura 6, colore rosso scuro).

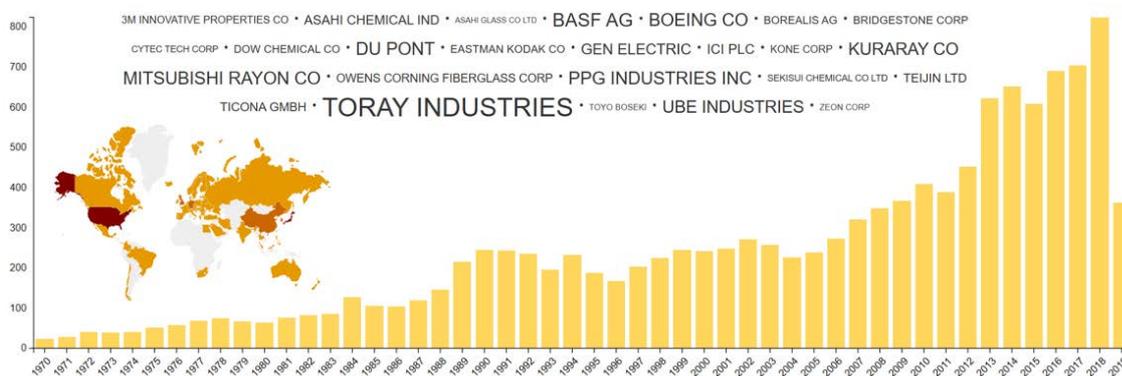


Figura 6 Numero di brevetti nel cui nome compaiono le parole "fibre reinforced polymer" dal 1970 al 2019. Sopra ci sono i nomi delle industrie che hanno brevettato e a sinistra si mostra la localizzazione del mondo di questi brevetti. Fonte: www.patentinspiration.com.

Dalla emergente possibilità di ridurre i costi di produzione delle fibre e delle matrici, dovuto all'interessamento sempre maggiore di aziende del settore, è nata anche la

necessità di rendere sicuro e prevedibile il comportamento di questi nuovi materiali; conseguentemente il mondo scientifico si è mosso in questa direzione pubblicando articoli scientifici riguardanti i materiali compositi (Figura 7). Nella figura a seguito si mostrano due dati: a sinistra il numero di articoli scientifici pubblicati per anno e per editore che riguardano i materiali compositi; a destra il numero di pubblicazioni per nazione.

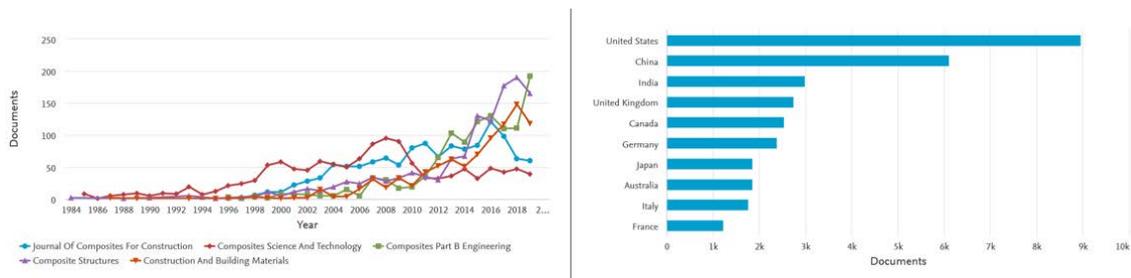


Figura 7 A sinistra: numero di articoli scientifici pubblicati dal 1984 al 2019 nel cui nome compaiono le parole "fibre reinforced polymer". A destra: numero di articoli pubblicati per nazione di appartenenza. Fonte www.scopus.com.

Il motivo di questo aumento di interesse nello studio dei materiali compositi è da ricercare nella larga applicabilità di tali materiali, come l'aerogramma successivo ci mostra (Figura 8). Più del 38% degli articoli pubblicati in letteratura riguardano l'ambito ingegneristico, mentre la rimanente percentuale riguarda la scienza dei materiali e altre aree di studio.

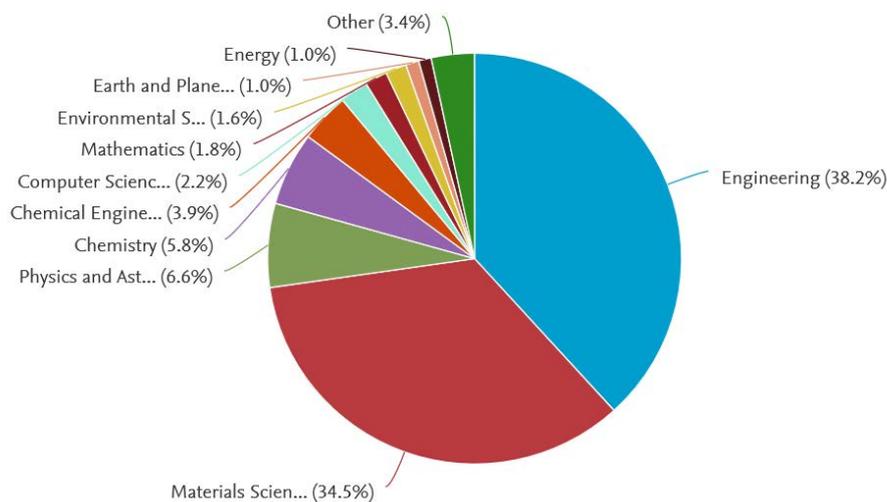


Figura 8 Articoli suddivisi in base al campo di studio. Fonte www.scopus.com.

Indagando ulteriormente questo 38% di articoli scientifici nel campo dell'ingegneria, si scopre che quelli che menzionano il monitoraggio dell'integrità strutturale (SHM) sono in continuo aumento, con un'intensificazione dal 2012 ad oggi (Figura 9).

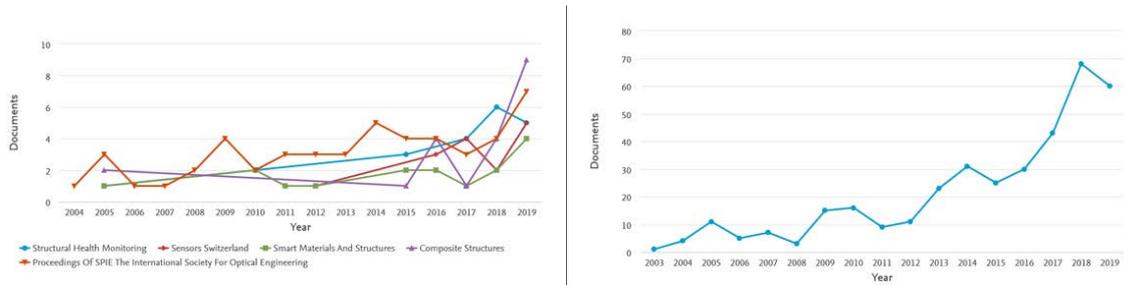


Figura 9 A sinistra: numero di articoli scientifici pubblicati ogni anno dalle riviste scientifiche dove si menziona la parola "structural health monitoring". A destra: numero totale di documenti pubblicati fino dal 2003 al 2019. Fonte www.scopus.com.

L'integrità strutturale per i compositi è uno dei campi di studio ancora aperti e di fondamentale importanza. Infatti, tali materiali hanno un comportamento fragile che risulta rischioso in ambienti in cui milioni di persone li utilizzano inconsapevolmente (treni, edifici, automobili o aerei di linea), poiché la rottura avviene di schianto senza avvisaglie visive. Per questa ragione in letteratura, parallelamente alle tecniche già esistenti ed utilizzate, si sono sviluppati ulteriori strumenti innovativi per il controllo strutturale in tempo reale delle strutture realizzate con i materiali compositi.

In questa tesi si vuole dare una panoramica generale sulle tecniche per il monitoraggio dell'integrità strutturale – in inglese *Structural Health Monitoring* – utilizzate dalle normative di riferimento, ma anche quelle future che sono attualmente in fase di sviluppo; in questo contesto si propone uno sviluppo sperimentale in laboratorio di una tecnica di SHM piezoresistiva (CAPITOLO 3).

CAPITOLO 1

Le tecniche di l'indagine per l'integrità strutturale

In questo capitolo si descriveranno le tecniche di controllo non distruttivo (in inglese *NdE*) attualmente utilizzate per il controllo dell'integrità strutturale; esse sono descritte dalla normativa di riferimento UNI EN ISO 9712, che descrive anche le tecniche adottate per i materiali compositi fibro-rinforzati.

I campi di utilizzo dei materiali compositi sono molteplici (*Tabella 1*) e le tecniche di SHM utilizzate sono principalmente 5:

- Radiografia (RT)
- Ultrasuoni (UT)
- Termografia (TT)
- Shearografia (ST)
- Emissione Acustica (AT)

SETTORE	APPLICAZIONI
Aeronautico	Parti di ala, code, fusoliere, pannelli interni, pale di elicottero
Automotive	Parti di carrozzeria, spoiler, cabine per camion, pannelli porta strumenti
Civile, edilizia	Condotte sotterranee, elementi di rinforzo per ristrutturazione, recinzioni
Nautico	Scafi, vele, ponti, profili strutturali, alberi, cordame
Sportivo	Canne da pesca, mazze da golf, biciclette, sci, canoe, racchette da tennis

Tabella 1 Campi di applicazione dei materiali compositi

Per brevità si descriveranno le tecniche attualmente più utilizzate nell'ambito navale, aeronautico, meccanico e civile per l'indagine di integrità strutturale non distruttiva.

Radiografie

Le radiografie possono essere di due tipologie:

- CR (computer radiography);
- DR (digital radiography).

Queste due tecniche sono in grado di rilevare principalmente i seguenti difetti:

- Variazione di densità nella matrice;
- Danni da impatto (con liquido di contrasto);
- Cricche e delaminazione (con liquido di contrasto);
- Presenza di porosità.

Un miglioramento di questa tecnica è stato portato dai micro-tomografi 3D, i quali permettono di ottenere delle scansioni tridimensionali dell'oggetto in materiale composito. La micro-tomografia 3D permette di individuare cricche e delaminazioni nella scala dei micrometri (1-10 μm) e vedere anche l'allineamento delle fibre nella matrice.

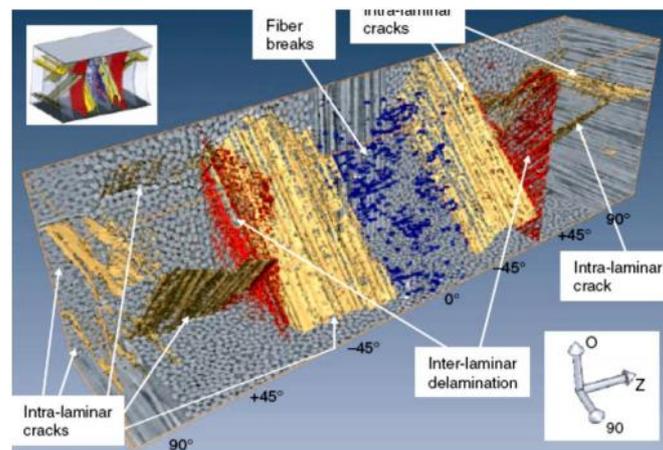


Figura 10 Tomografia 3D moderna di un campione in carbonio e resina epossidica

Il limite principale delle radiografie sono i materiali come il carbonio che hanno la proprietà di essere radiotrasparenti (risultano quindi essere trasparenti nelle immagini radiografiche): non è quindi possibile vedere rotture di fibra in questo specifico caso, a meno di aggiungere liquidi di contrasto.

Il secondo limite è la pericolosità delle radiazioni (raggi x) e la non facile trasportabilità degli apparecchi radiografici.

Ultrasuoni

I metodi ad ultrasuoni sono i più utilizzati perché sono facilmente trasportabili e relativamente meno costosi rispetto agli altri metodi per i controlli non distruttivi.

Le modalità di scansione possibile su di un materiale sono 3:

- A scan (visione unidimensionale del pezzo)
- B scan (visione bidimensionale del difetto ma su di un solo asse)
- C scan (mappa 2D di un difetto su di una area)

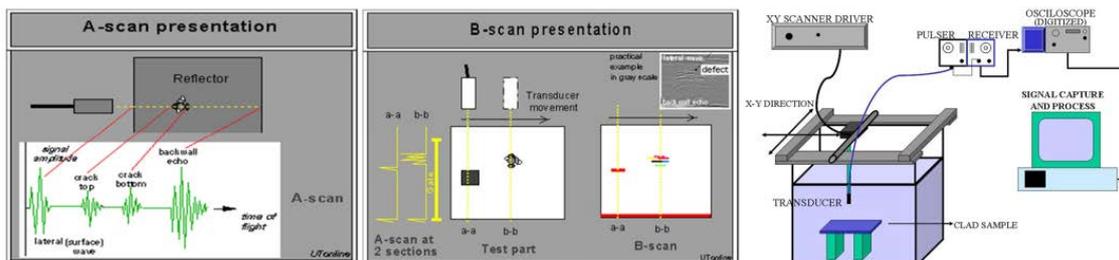


Figura 11 Da sinistra a destra rispettivamente A, B e C scan con il metodo degli ultrasuoni

Per i componenti strutturali in materiale composito sono solitamente utilizzati il B e C scan perché è necessario avere una visione completa dell'area del pezzo esaminato. Evidentemente il B e il C scan non sono strumenti portatili, in quanto hanno bisogno di una movimentazione con un sistema CNC e di una vasca di liquido (acqua) per accoppiare la sonda con il materiale in esame.

Il limite che hanno queste tecniche si può imputare alla "soggettività" che l'operatore impiega nell'interpretare le misure in base all'esperienza che ha accumulato nella lettura sul campo con lo strumento; infatti è possibile che per un difetto sia scambiato dall'operatore per un eco di una superficie, oppure che la lettura sia stata fatta nel modo sbagliato, rendendo impossibile l'individuazione del difetto.

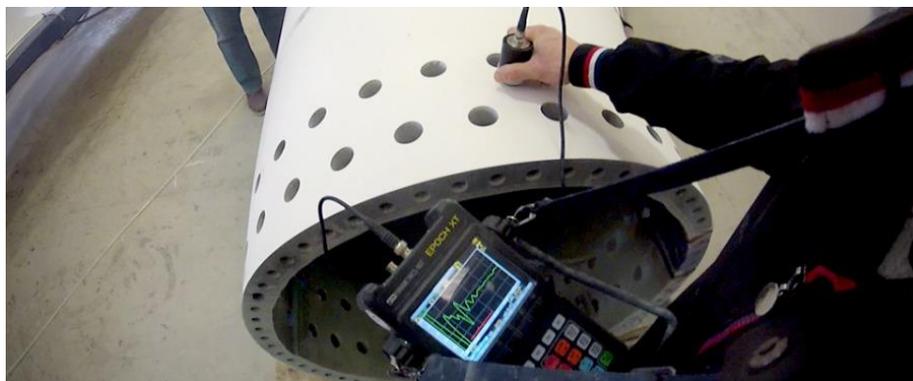


Figura 12 Indagine ultrasonica sul campo

Termografie

Le tecniche per le indagini termografiche più utilizzate sono le seguenti:

- Termografia flash (irraggiamento con lampade alogene o allo xeno);
- Termografia lock-in (ultrasuoni che fanno aumentare la temperatura del materiale).

Entrambe sfruttano il principio di assorbimento di energia dovuto a irraggiamento o energia meccanica prodotta da un emettitore piezoelettrico; le onde elettromagnetiche o le onde meccaniche vengono assorbite dal materiale e quest'ultimo aumenta la propria temperatura di qualche centesimo di grado. Se nel materiale composito fossero presenti cricche, porosità o delaminazione ci sarebbe presenza di aria. Quest'ultima ha un coefficiente di conducibilità termica molto inferiore rispetto alle fibre o alla matrice, pertanto la termocamera potrà rilevare dei "punti caldi" in cui l'aria è intrappolata, rivelando così i difetti.

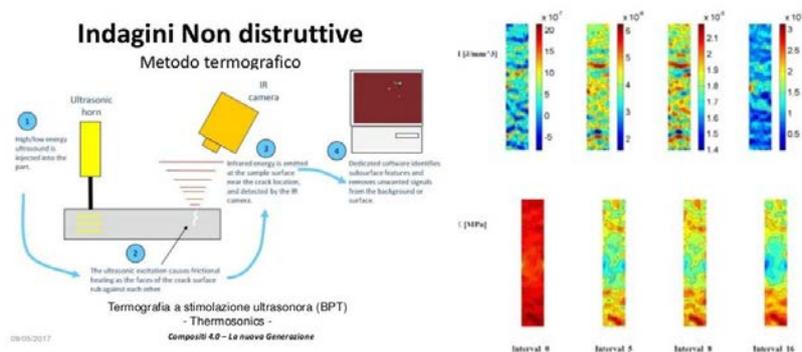


Figura 13 Schema di un sistema per il rilevamento di immagini termografiche e delle immagini di un provino in materiale composito con difetti.

Il vantaggio rispetto alle precedenti tecniche di indagine è legato al fatto che si può acquisire e analizzare una superficie di materiale molto ampia e in modo rapido.

Resta comunque il problema che sul campo la temperatura dell'ambiente non è controllata, pertanto le misurazioni possono subire fluttuazioni di temperatura durante la giornata di misurazione e non saranno molto precise; fotografare grandi aree implica trascurare i piccoli difetti, perché la sensibilità della termocamera non è così alta.

Nemmeno il costo dell'attrezzatura non è da sottovalutare perché per disporre di una termocamera con sensibilità di alcuni centesimi di grado è necessario investire più di 100000€.

CAPITOLO 2

Ricerca nella letteratura scientifica

La ricerca è stata condotta sulla banca dati scientifica che raccoglie articoli nell'ambito ingegneristico *COMPENDEX* (COMPUterized ENgineering InDEX). Per la ricerca all'interno di questa banca dati sono stati utilizzati i motori di ricerca *Scopus* ed *Engineering Village*. L'obiettivo della ricerca è trovare e catalogare gli articoli scientifici che facevano riferimento allo *Structural Health Monitoring (SHM)* con un *focus* per i materiali polimerici fibro-rinforzati (*FRP*); le parole chiave ricercate sono state "SHM", "FRP".

Volendo riassumere in uno schema le tecniche indagate da vari autori negli articoli scientifici è possibile individuare 4 macro-aree:

- Metodi ultrasonici;
- Metodi termografici;
- Misure ottiche;
- Misure elettriche;

Allo stato dell'arte attuale, per quanto riguarda gli articoli trovati, solamente i metodi ultrasonici, le misure ottiche e le misure elettriche sono adatte ad una implementazione software, associata a strumenti di acquisizione, in grado di monitorare in tempo reale l'integrità strutturale di un materiale polimerico fibro-rinforzato. Le tipologie di intervento che si possono realizzare per implementare un metodo di controllo SHM in real-time sono descritte in base alla dimensione spaziale in cui si vuole intervenire. Schematicamente si può suddividere gli interventi in questo modo:

- 3D: modifica dell'intera matrice polimerica o delle fibre di rinforzo per dare proprietà fisiche o chimiche particolari (*bulk solutions*);
- 2D: modifica all'interno del laminato, tra le fibre o tra gli strati delle fibre o dei tessuti (*embedded solutions*);
- 1D: modifica superficiale, non si modifica nulla all'interno del materiale composito, ma si interviene con soluzioni locali (*in situ solutions*).

Avendo prestabilito di voler realizzare un sistema di monitoraggio SHM in real-time che possa essere applicato anche su strutture esistenti, l'unica possibilità che si è considerata è stata quella di investigare più approfonditamente sulle tecniche di SHM per la tipologia 1D, dando spazio anche ad alcune tecniche 2D da cui è possibile capire le differenze. Questa scelta permette di andare a ricercare soluzioni possibilmente di semplice realizzazione e implementazione, senza intervenire sul processo di fabbricazione dei materiali FRP.

Gli articoli trovati saranno mostrati in forma sintetica e raggruppati in base al principio fisico che sfruttano.

Metodi piezoresistivi (1D)

Queste tecniche sfruttano la caratteristica piezoresistiva dei materiali conduttori o semiconduttori di elettricità; la piezoresistenza è la proprietà che ha un materiale, sottoposto ad una deformazione meccanica o termica, di cambiare la propria resistenza elettrica.

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_L - 2\varepsilon_D$$

Questa caratteristica viene sfruttata di sovente per correlare la variazione di resistenza con la deformazione meccanica applicata. Per valutare la sensibilità di misura di un sensore piezoresistivo è utile calcolare quello che viene definito Gauge Factor (GF), il GF indica la variazione di resistenza rispetto alla deformazione meccanica applicata.

$$GF = \frac{dR}{R} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{Assiale}} = \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{Assiale}} + (1 + 2\nu)$$

[2] HYBRID SPRAY-COATING, LASER-SCRIBING AND INK-DISPENSING OF GRAPHENE SENSORS/ARRAYS²

L'articolo presenta un metodo per creare dei sensori piezoresistivi di qualunque forma e dimensione utilizzando un sottile strato di Grafene Ossidato (GO). Lo strato viene depositato su di un pannello in fibra di vetro e resina epossidica (GFRP) con uno spray che contiene una miscela di acqua deionizzata e GO; l'acqua in soluzione con il GO viene fatta evaporare riscaldando il pannello in GFRP a 90°C. Successivamente il pannello viene introdotto in una macchina per incisione laser, che incide il GO nel

² [3]

panello riducendolo a Grafene (G) e saldandolo fisicamente alla superficie del pannello GFRP.

Si possono ottenere sensori assiali, ma anche multidirezionali di qualsiasi forma e dimensione; i GF che si possono ottenere sono circa di 450, perciò li rende molto precisi e leggibili.

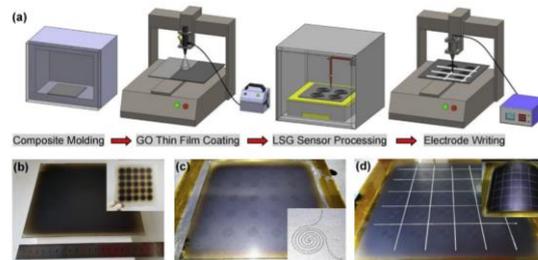


Figura 14 Processo di produzione dei sensori piezoresistivi in GO

I dati sperimentali confermano la qualità del sensore e la elevata sensibilità che ha nel rilevare piccole deformazioni (0,2%). Oltre alle precedenti caratteristiche questo tipo di sensore gode di una ottima stabilità e resistenza alla fatica, infatti si ha una diminuzione del GF del 5,4% dopo circa 10000 cicli di fatica a 0,6% di deformazione.

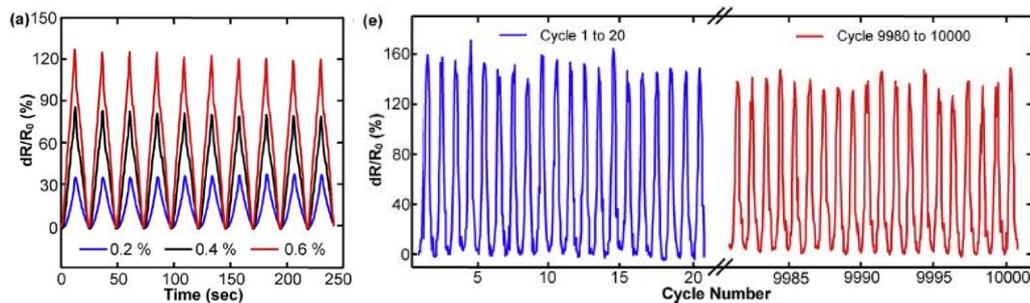


Figura 15 a) Relazione tra resistenza elettrica e deformazione; e) Test di fatica ciclica sul sensore con una deformazione applicata de 0,6%

[3] IMPACT PAINT SENSOR BASED ON POLYMER/MULTIDIMENSION CARBON NANO ISOTOPES COMPOSITES³

In questo articolo si descrive una vernice composta da nanoparticelle miscelate con resina epossidica (Epoxy), oppure con polistirene (PS) liquido. Lo scopo che gli autori si prefiggono è quello di fabbricare e caratterizzare un sensore piezoresistivo realizzando un sottile strato di vernice (*thin film sensor*), che sarà depositato per mezzo di uno spray su di un pannello in polimero fibro-rinforzato con fibre di carbonio (CFRP). Il pannello in CFRP sarà poi sottoposto ad una deformazione per valutare l'efficacia

³ [4]

del sensore. I nanocomposti utilizzati sono *Multi Wall Carbo Nanotubes (MWCNT)* e *Graphene Nano Platelets (GnP)*.

Il *thin film sensor* più promettente risulta essere quello costituito da un mix di *MWCNT* + *GnP* + *PS*, questa miscela realizza sensori con un Gauge Factor di circa 350, che li rende molto sensibili anche a minime variazioni di deformazioni.

Il vantaggio innegabile di questo tipo di sensori è quello di poter essere “verniciati” sopra alla struttura da indagare e di poter creare griglie sensibili in grado di rilevare impatti in tempo reale (Fig 3).

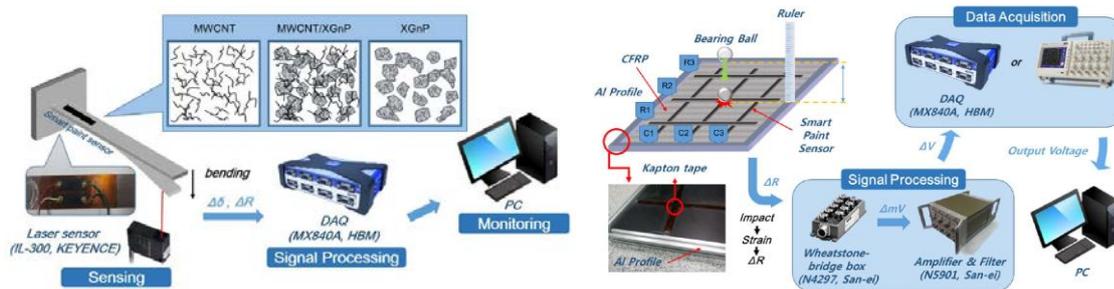


Figura 16 Rappresentazione schematica del sensore e del sistema di acquisizione elettronico. A destra la griglia sensibile agli impatti.

Gli autori dimostrano come il loro sensore piezoresistivo sia paragonabile ad un sensore commerciale in metallo (Fig.4) e che la griglia per impatti realizzata su di una superficie 1 m² su di un laminato in CFRP riesce a rilevare impatti anche minimi (0,07÷1 J) e la tensione di output della griglia è proporzionale all’impatto e anche alla distanza dell’impatto rispetto al centro della griglia. Queste caratteristiche permetteranno di creare un network di sensori in grado di indentificare la posizione e l’entità dell’impatto in tempo reale (Fig.5).

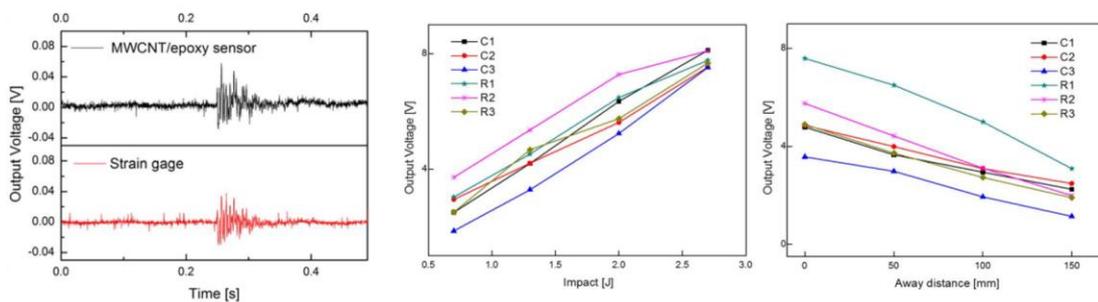


Figura 17 A sinistra: confronto tra un sensore commerciale con quello sviluppato nell’articolo. A destra: relazione tra tensione di output con energia di impatto e distanza dal centro della griglia di sensori

[4] SWCNT/GRAPHITE NANOPLATELET HYBRID THIN FILMS FOR SELF-TEMPERATURE-COMPENSATED, HIGHLY SENSITIVE, AND EXTENSIBLE PIEZORESISTIVE SENSORS⁴

Gli autori di questo articolo presentano un sensore del tipo *thin film* costituito da due strati sovrapposti di *Single Wall Carbo Nanotubes (SWCNT)* e *Graphite Nano Plateletes*, in soluzione con acqua deionizzata e un surfattante, depositati tramite spray su di un substrato flessibile in PET.

L'obiettivo di questo studio è quello di creare un sensore che non abbia variazioni di resistenza dovute alla variazione di temperatura (entro certi limiti).

Sfruttando i coefficienti di dilatazione termica opposti dei SWCNTs e dei GnPs e sovrapponendo opportunamente i due strati dei due composti nanometrici si può ottenere un sensore che ha dilatazione termica nulla, o comunque prossima a zero.

I risultati che si ottengono sono promettenti per quanto riguarda la auto-compensazione della dilatazione termica (Fig.5), ma rispetto al precedente studio [4], il GF scende a 5, riducendo la sensibilità del sensore.

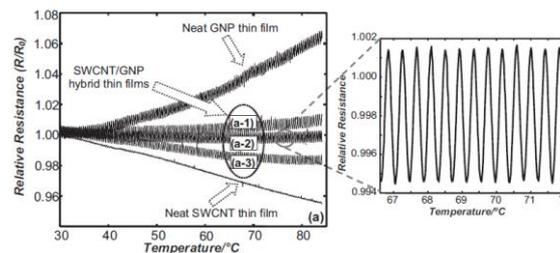


Figura 18 Variazione di resistenza del sensore all'aumentare della temperatura

Ciò non toglie che le misure eseguite sul sensore portano comunque a leggere e correlare la variazione di resistenza con la deformazione meccanica applicata (Fig.6).

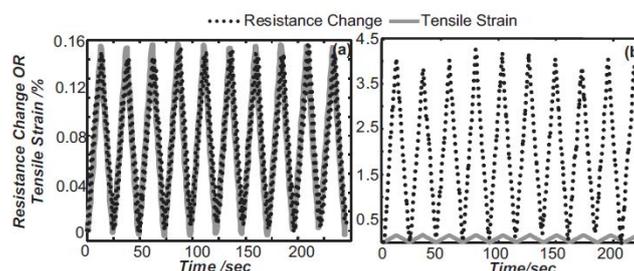


Figura 19 Correlazione tra variazione di resistenza del sensore rispetto alla deformazione meccanica applicata nel caso di deformazione ciclica

⁴ [5]

[7] RESEARCH OF A NOVEL 3D PRINTED STRAIN GAUGE TYPE FORCE SENSOR⁵

In questo articolo viene presentato un sensore piezoresistivo stampabile con una stampante inkjet; la stampante utilizza un inchiostro a base di un polimero conduttivo (PEDOT/PSS) che ha proprietà piezoresistive.

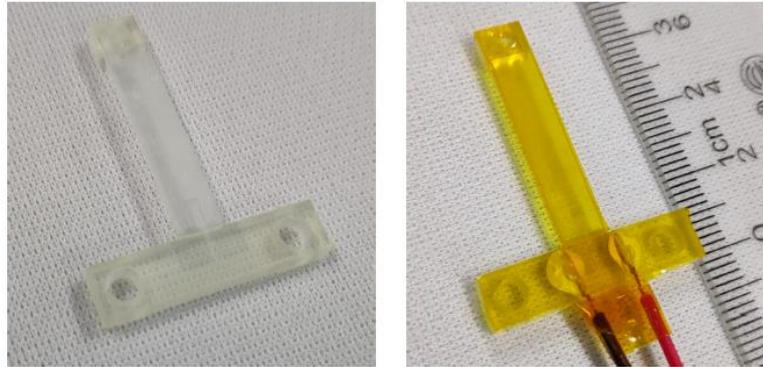


Figura 20 Costruzione del sensore di forza e collegamenti elettrici all'acquisitore di tensione.

Lo scopo degli autori è di realizzare un sensore di forza completamente realizzato con una stampante 3D che sia scalabile e industrializzabile.

Durante la fase di caratterizzazione gli autori hanno stampato un sensore costituito da 3 layer e hanno calcolato il GF che risulta 0,98.

Il sensore è funzionale e riesce a misurare anche piccole variazioni di deformazione applicata, ma ha problemi di isteresi, in quanto il sensore ha diminuito la sua resistenza del 2% durante 27 cicli di carico e scarico.

Un altro aspetto tenuto in considerazione dagli autori è la stabilità della resistenza nel tempo e si è notato che essa è aumentata dopo 80 giorni di vita (Fig.7).

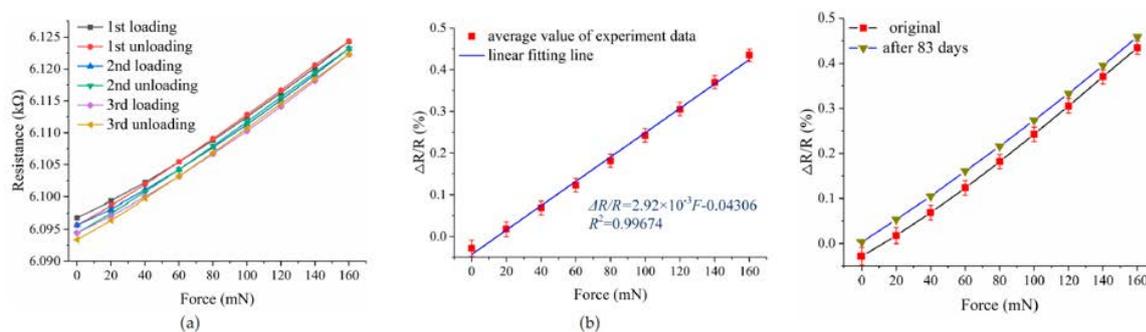


Figura 21 A sinistra: ciclo di isteresi del sensore. Al centro: linearità tra variazione di resistenza e forza applicata. A destra: Resistenza che aumenta dopo 80 giorni di inattività del sensore

⁵ [8]

Metodi Capacitivi (1D)

Le tecniche di SHM che sfruttano la caratteristica dielettrica di un materiale sono definite metodi capacitivi e utilizzano la fisica di un condensatore; se si considera il sistema fibra + matrice come un isolante e si creano due armature sulla superficie dell'isolante si ottiene di fatto un condensatore.

Quando una deformazione meccanica è applicata al materiale composito FRP, che abbia una matrice con proprietà isolante, si può misurare una variazione di capacità dovuta all'effetto poisson che assottiglia lo spessore del laminato FRP.

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon' \frac{A}{d}$$

Come si può ben notare dalla formula classica di un condensatore a due piastre se il laminato si assottiglia la distanza "d" diminuirà, accrescendo la capacità del condensatore.

Un'altra grandezza che spesso viene misurata è la costante dielettrica relativa "ε". Il motivo è che se la costante dielettrica relativa si modifica nella matrice del materiale FRP può indicare l'inizio di formazione di cricche trasversali o di delaminazione, che sono i due meccanismi principali che portano alla rottura delle fibre e di conseguenza della struttura in FRP.

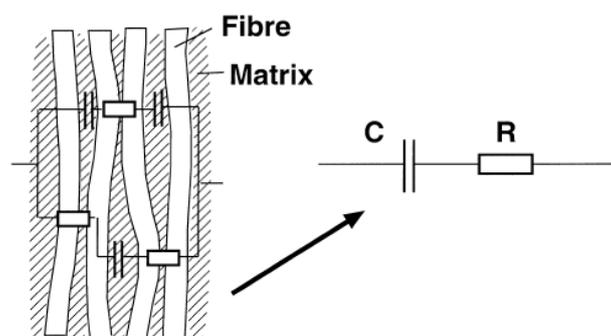


Figura 22 Circuito equivalente che rappresenta la resistenza delle fibre (se conduttive) e della matrice isolante (dielettrico)

[6] NON DESTRUCTIVE TESTING OF FRP BY D.C. AND A.C. ELECTRICAL METHODS⁶

Gli autori dell'articolo indagano la possibilità di realizzare un sensore capacitivo su di un pannello in CFRP per costruire un sistema di SHM che cerca di individuare le cricche trasversali e la delaminazione attraverso lo spessore del laminato. In questo studio si realizzano due armature metalliche, sulle facce opposte del laminato, che vengono collegate ad un misuratore LRC per misurare la capacità e la dissipazione del circuito equivalente costituito da un condensatore (Armature + matrice dielettrica) e una resistenza (le fibre di carbonio) (Fig.10).

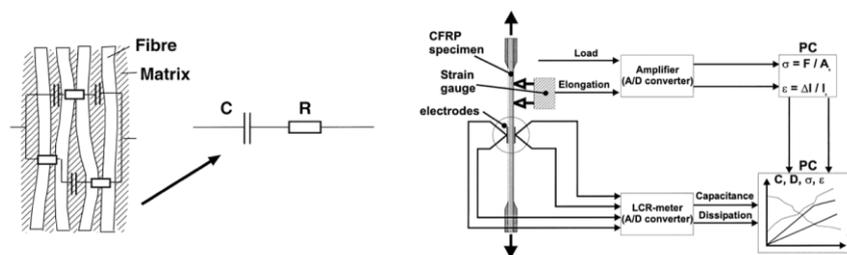


Figura 23 Circuito equivalente e, a destra, lo schema per il metodo di misurazione della capacità e della dissipazione.

Contrariamente a quanto ci si aspetterebbe la capacità diminuisce perché la costante dielettrica relativa diminuisce quando le fibre di carbonio entrano in contatto tra di loro. L'evidenza del danneggiamento si trova nel grafico della capacità durante un test di fatica ad ampiezza variabile. Si può notare che la capacità continua a decrescere ciclo dopo ciclo, il che significa che c'è un accumulo di danno che può essere monitorato con questo metodo.

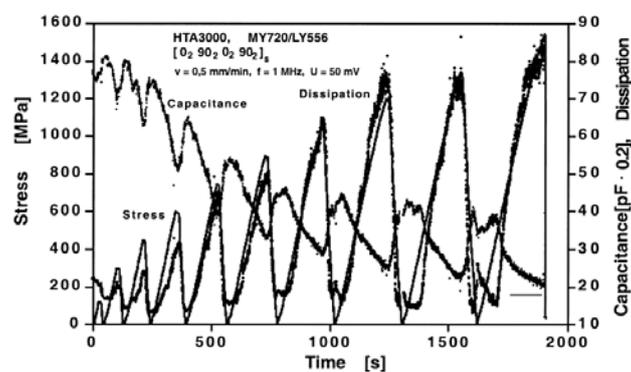


Figura 24 Ciclo di fatica ad ampiezza variabile, la capacità continua a diminuire ed è sintomo di accumulo di danneggiamento.

⁶ [7]

[8] NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF LAMINATED COMPOSITE PLATES USING DIELECTROMETRY SENSORS⁷

Lo studio condotto in questo articolo presenta una diversa applicazione del concetto del precedente articolo [1], infatti, sfruttando il campo di bordo di un condensatore a piastre, si depositano sulla superficie di un pannello in GFRP due armature in materiale conduttivo. Le armature sono disposte sullo stesso piano ed equivalgono a due condensatori in parallelo, i quali hanno come materiale dielettrico l'aria e il pannello di GFRP (Fig.12).

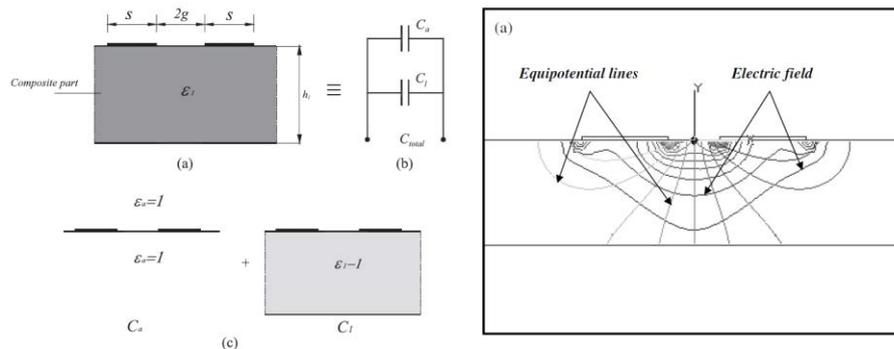


Figura 25 Schema del condensatore a piastre sulla superficie del pannello in GFRP.

Con un misuratore LRC si interroga il condensatore attraverso due terminali saldati alle armature. Gli autori hanno anche verificato attraverso un modello FEM come la capacità sarebbe variata inserendo nel laminato dei vuoti che simulano la delaminazione, e se riempiti di acqua, simulano la presenza di umidità. Hanno avvalorato i risultati con delle prove sperimentali, che correlano la variazione di capacità alla presenza di delaminazione o intrusione di acqua a diverse profondità lungo lo spessore del laminato (Fig.13).

⁷ [9]

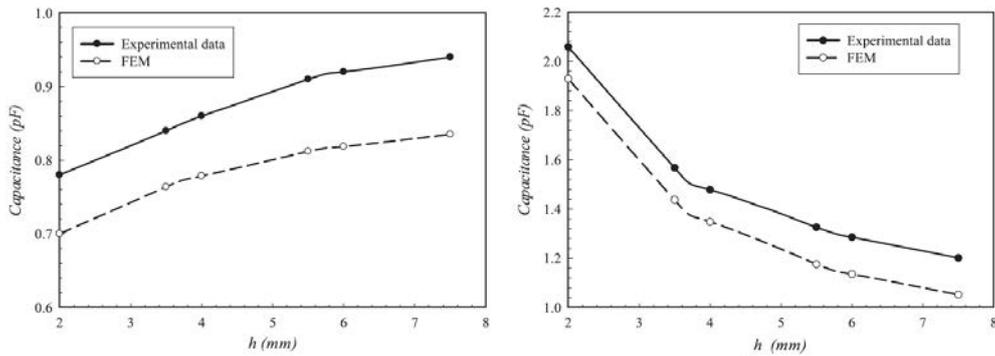


Figura 26 A sinistra variazione della capacità rispetto alla profondità della laminazione. A destra: variazione della capacità rispetto alla profondità di intrusioni di acqua.

[9] A WIRELESS SHORTWAVE NEAR-FIELD PROBE FOR MONITORING STRUCTURAL INTEGRITY OF DIELECTRIC COMPOSITES AND POLYMERS⁸

Gli autori presentano un innovativo sistema di monitoraggio strutturale basato sul principio della frequenza di risonanza di un circuito LC; quando il sistema viene eccitato con una certa frequenza dovuta ad un campo elettrico oscillante (corrente alternata), il condensatore e l'induttore entrano in risonanza. In base al tipo di dielettrico che c'è tra le armature del condensatore la frequenza di risonanza cambia ed è proprio questo cambiamento che gli autori dell'articolo correlano all'accumulo di danneggiamento che sta avvenendo in un materiale FRP. Il sistema di misura della frequenza di risonanza è un lettore LRC munito di una spira che per mutua induzione eccita il circuito LC, la lettura della frequenza di risonanza determina lo stato di salute del materiale (Fig.12).

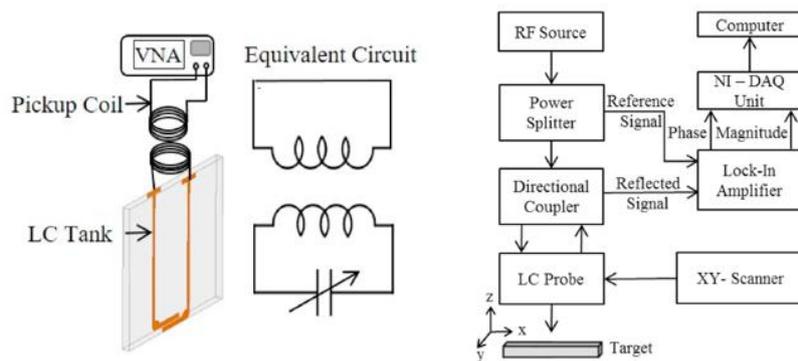


Figura 27 Schema del circuito LC applicato al laminato e, a destra, schema del sistema di acquisizione del segnale

⁸ [10]

Il sistema schematizzato permette di interrogare il circuito LC wireless o tramite connessioni fisiche (contatti) per mezzo di un lettore LRC in grado di trovare la frequenza di risonanza del circuito.

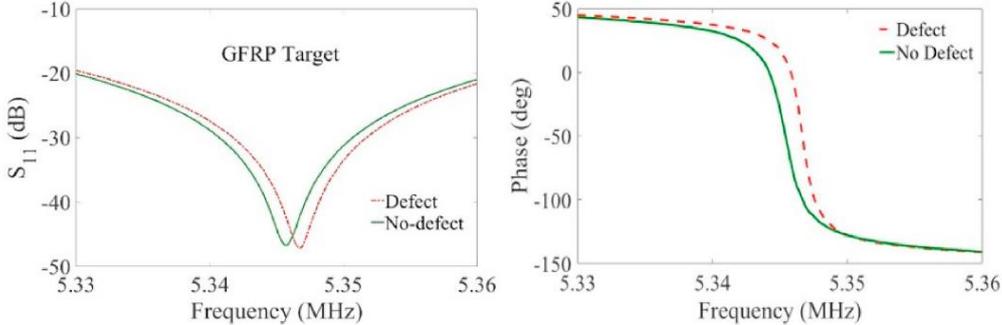


Figura 28 Grafici della risposta in frequenza del circuito LC in un laminato GFRP integro e con un difetto.

Metodi Ultrasonici (1D)

I metodi ultrasonici sfruttano la propagazione di una vibrazione meccanica attraverso un mezzo. L'onda sonora che si propaga può essere in parte riflessa da difetti presenti nel materiale e in parte assorbita dal mezzo. Gli eventuali difetti presenti all'interno del materiale sono captati dal ricevitore come echi, o picchi di intensità minore; è possibile costruire un sistema di monitoraggio 1D attraverso le Guided Ultrasonic Waves (GUW). Queste particolari onde possono essere create e guidate attraverso il mezzo per valutare un'area più vasta rispetto a quella analizzabile con la tecnologia ultrasonica classica.

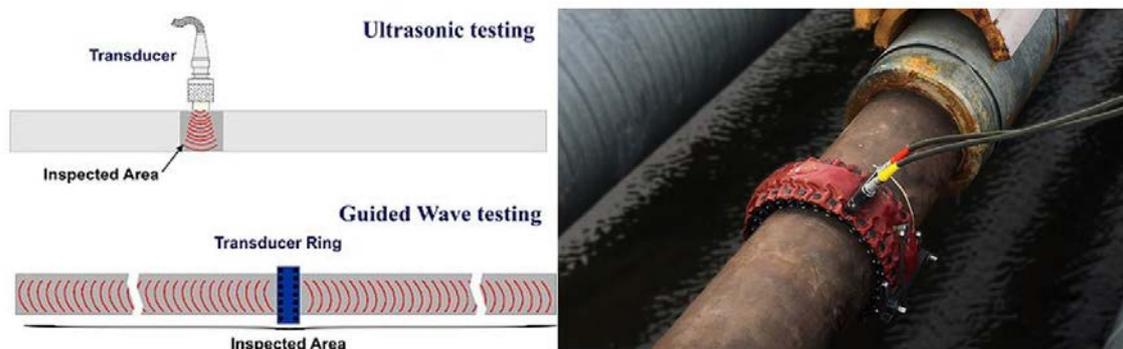


Figura 29 Esempio di onde ultrasoniche GUW

Sono sistemi che si avvalgono di più emettitori e ricevitori che lavorano in sincrono per ottenere un'immagine ultrasonica completa di tutta l'area misurata.

Sono tecniche solitamente utilizzate per analizzare tubature o binari per rilevare la perdita di spessore per corrosione o usura.



Figura 30 Software che rileva lo spessore del tubo in analisi con le GUW.

[10] SPARSITY-BASED APPROACHES FOR DAMAGE DETECTION IN PLATES⁹

In questo studio si utilizza un emettitore ed un ricevitore di Guided Ultrasonic Waves (GUW) che può localizzare e quantificare il danno all'interno di un laminato in FRP.

Il metodo consiste nel realizzare una matrice DCM (Dictionary Characterization Matrix) che contiene nelle sue colonne dei vettori che descrivono il comportamento di un pannello in FRP danneggiato in un punto preciso, di coordinate note. Il vettore che andrà nelle colonne della matrice DCM è sottratto del segnale di fondo del pannello non danneggiato.

Il segnale emesso dall'emettitore piezoelettrico è un segnale costituito da 5 pulsazioni alla stessa ampiezza e alla stessa frequenza, quindi in presenza di un difetto l'ampiezza delle onde sonore, captate dal ricevitore ultrasonico, sarebbe diversa. Il vettore che il ricevitore capta viene confrontato con quelli presenti nella matrice DCM e viene calcolata la posizione del difetto, poiché la DCM contiene il vettore che più somiglia al segnale del laminato danneggiato in quel punto o in prossimità di esso (Fig.17).

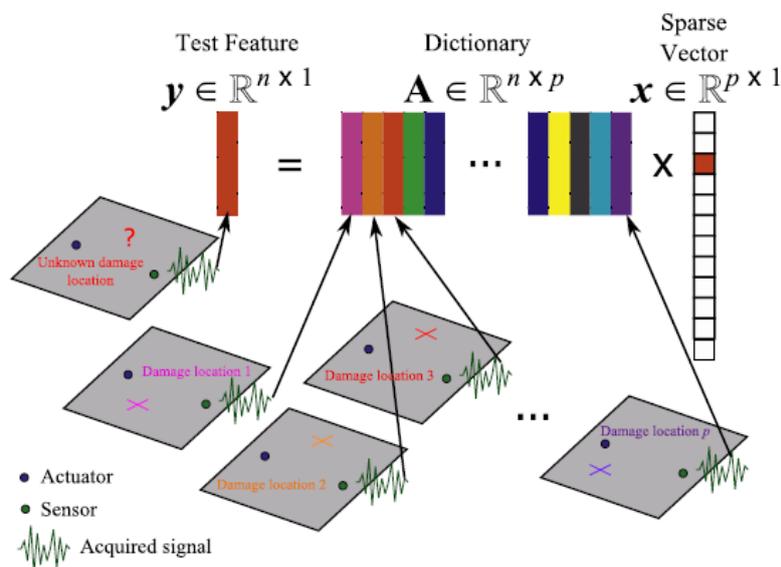


Figura 31 Illustrazione del metodo di localizzazione SSD-ON. Un segnale ultrasonico y viene inviato dall'emettitore e il ricevitore capta il segnale disturbato dalla presenza di un difetto. Attraverso la matrice DCM il segnale y viene comparato e un vettore puntamento x determina il punto dove il laminato è danneggiato.

⁹ [11]

Metodi piezoresistivi (2D)

[6] NON DESTRUCTIVE TESTING OF FRP BY D.C. AND A.C. ELECTRICAL METHODS¹⁰

In questo articolo, già citato in precedenza (pag.16), si indaga anche la possibilità di creare un sistema di SHM con laminati FRP con fibre conduttive, in questo particolare caso, fibre di carbonio.

Il fenomeno fisico utilizzato per questo sistema di monitoraggio è la piezo-resistività delle fibre di carbonio stesse. Quando il laminato è sottoposto a trazione le fibre si allungano variano la loro resistenza elettrica in una relazione “quasi-lineare” tra resistenza elettrica e deformazione meccanica (Fig.23 a sinistra).

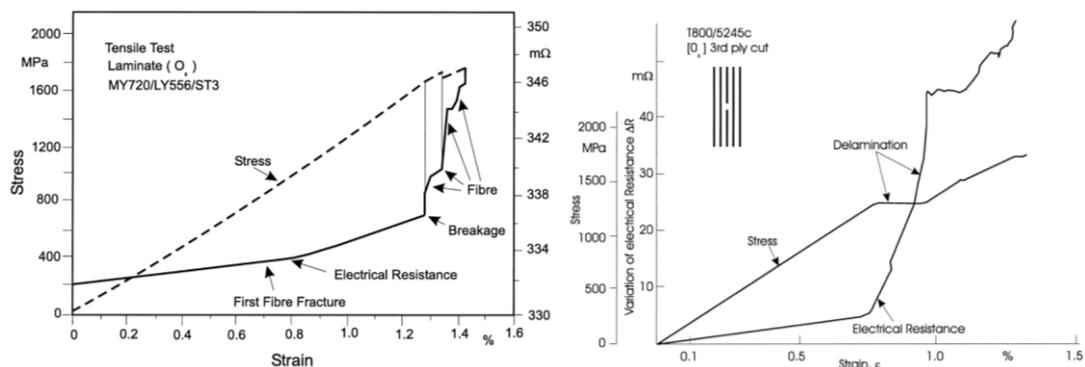


Figura 32 Relazione quasi-lineare tra variazione di resistenza elettrica e deformazione meccanica applicata

La quasi-linearità vale per valori di deformazione prossimi allo 0,8%; al di sopra di tale valore le fibre di carbonio cominciano a cedere, rivelando un incremento della resistenza elettrica con pendenza differente. Nello studio si fa riferimento ad una zona di plateau nel grafico della trazione nella quale avviene la delaminazione del laminato [0₃]. In questa zona si può notare che la resistenza elettrica subisce un incremento repentino e gli autori indicano che questo cambio di pendenza può essere utilizzato per monitorare le delaminazioni (Fig.23 a destra).

¹⁰ [7]

[11] IMPROVED STRAIN SENSING PERFORMANCE OF GLASS FIBER POLYMER COMPOSITES WITH EMBEDDED PRE-STRETCHED POLYVINYL ALCOHOL-CARBON NANOTUBE FIBERS¹¹

Un'altra applicazione del tipo *embedded* viene utilizzata per monitorare l'integrità strutturale di un laminato costituito da 10 strati di tessuto in fibra di vetro [0/90]; il laminato viene prodotto tramite la tecnica di infusione sottovuoto.

Durante la posa degli strati di tessuto, tra il 9° e il 10° strato è stata inserita una fibra di PVA (PolyVinilAlcohol) che è stata precedentemente ricoperta con MWCNTs; la percentuale di CNTs sulla fibra di PVA è del 11,7%.

Durante la procedura sperimentale gli autori pre-tensionano, a diverse percentuali di deformazione (50%, 100% e 200%), le fibre di PVA per capire se l'allineamento dei CNTs influisce sulle proprietà piezoelettriche. La fibra di PVA viene ricoperta di MWCNTs tramite immersione in una soluzione di CNTs e un coagulante.

I risultati che si ottengono per quanto concerne la piezoresistività della fibra PVA sono mostrati in figura 24. Il parametro 1/CRS a cui si fa riferimento in figura 24 è in effetti la pendenza della curva che mette in relazione $\Delta R/R_0$ alla deformazione meccanica ϵ . (CRS = Change of Resistance to Strain)

$$CRS = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta(ERC)} \quad \text{or} \quad \frac{1}{CRS} = \frac{\Delta(ERC)}{\Delta \epsilon}$$

In letteratura scientifica questo parametro viene anche denominato GF (Gauge Factor).

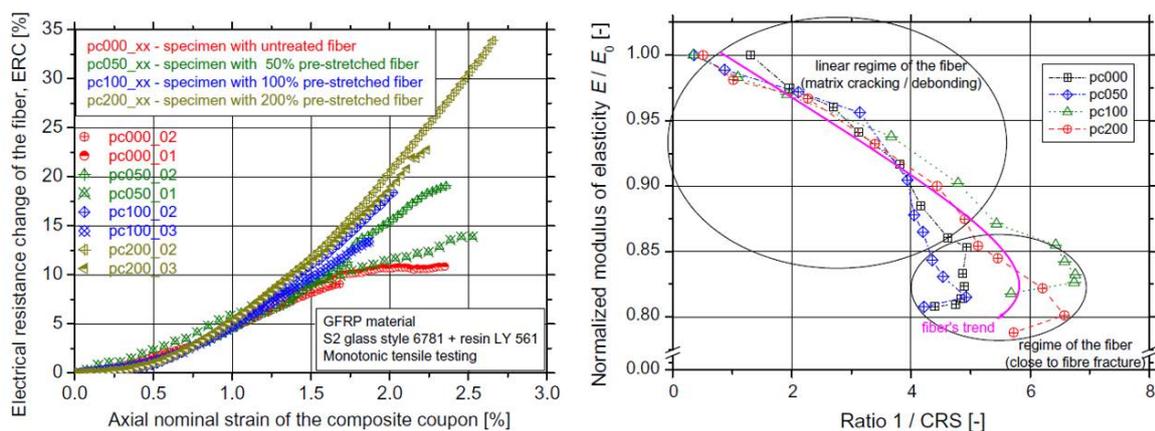


Figura 33 Piezoresistività delle fibre PVA a diverse percentuali di pre-tensionamento. A destra: Modulo elastico normalizzato rispetto al parametro 1/CRS.

¹¹ [12]

Gli autori dell'articolo hanno correlato il Modulo elastico normalizzato (E/E_0) e il rapporto $1/CRS$, trovando che all'aumentare del rapporto $1/CRS$ c'è una perdita di modulo elastico e questo fenomeno è dovuto alle delaminazioni e alle cricche trasversali; quando $1/CRS$ raggiunge i valori da 4 a 6 le fibre del laminato cominciano a cedere. Il calcolo di questo parametro viene eseguito per ogni load-step, calcolando il parametro come mostrato in figura 25.

$$\frac{1}{CRS} = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta \varepsilon}$$

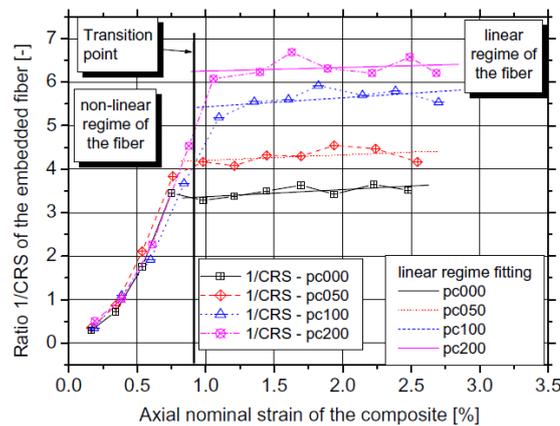


Figura 34 Grafico che mette a confronto $1/CRS$ con la deformazione meccanica.

[1] STRUCTURE DEPENDENT PROPERTIES OF CARBON NANOMATERIALS ENABLED FIBER SENSORS FOR IN SITU MONITORING OF COMPOSITES¹²

Gli autori in questo studio hanno utilizzato una tecnica embedded (2D) per il monitoraggio strutturale di un laminato cross-ply, costituito da un tessuto in fibra di vetro [0/90]. Nel tessuto è stato rimpiazzato un bundle di fibre di vetro con uno ricoperto da MWCNTs oppure GO, inoltre è stata indagata anche l'opzione di rimpiazzare un bundle di fibra di vetro con un bundle di fibra di carbonio.

Per creare la fibra di vetro ricoperta con MWCNTs o GO è stato utilizzato un bagno con acqua deionizzata, MWCNTs oppure GO e un surfattante. Il bundle di fibra di vetro è stato avvolto su due bobine, di cui una motorizzata che, con velocità controllata di 10 mm/min, tirava il bundle nelle due vasche con la soluzione (Fig.26).

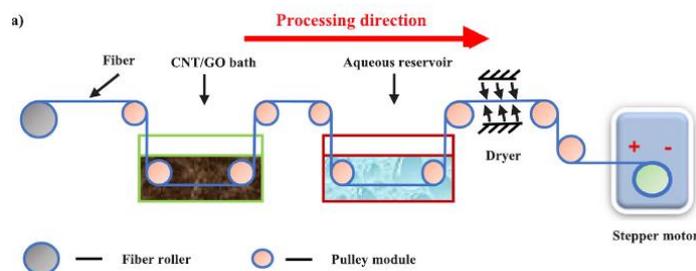


Figura 35 Processo di ricopimento del bundle in fibra di vetro con MWCNTs o GO

¹² [1]

I risultati che hanno ottenuto per queste soluzioni sono i seguenti mostrati in figura 27.

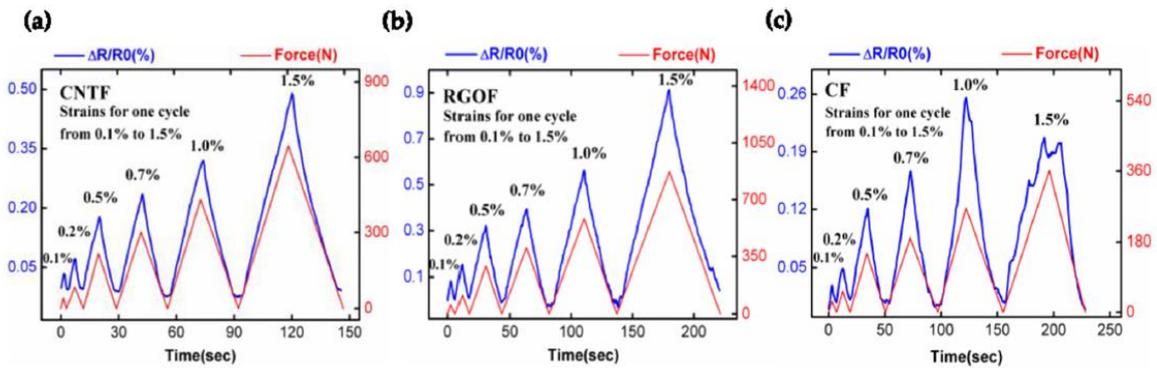


Figura 36 Grafici che mettono in relazione la variazione di resistenza elettrica misurata con la deformazione e il tempo. a) CNTs, b) GO, c) CF

Gli autori mostrano che la soluzione con la fibra di vetro ricoperta con CNTs varia la propria resistenza elettrica linearmente fino all'1% e successivamente con una legge di potenza tra l'1% a 5,9% di allungamento (Fig 28 (a) e (d)). Questo risultato beneficia di una più semplice implementazione di controllo elettronica.

Per quanto riguarda la vita a fatica del sensore ancora una volta i CNTs risultano i meno soggetti ad usura e danneggiamento dopo 3000 cicli da 0 a 0,5% di allungamento (Fig.28 a destra).

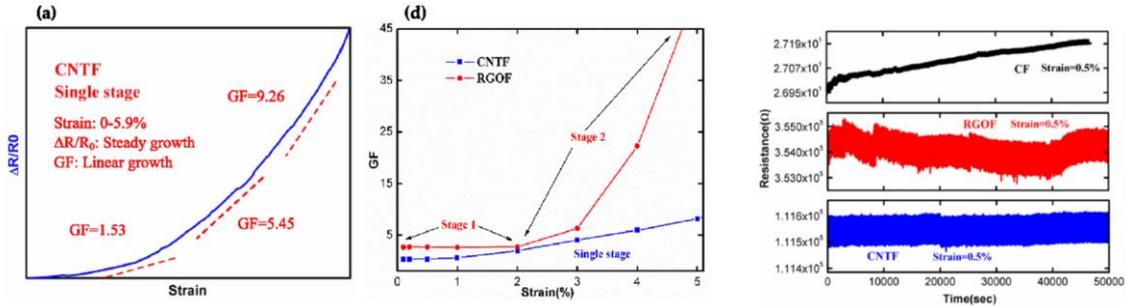


Figura 37 A sinistra: variazione di resistenza e di GF per il sensore con CNTs. A destra: Test di durabilità per i sensori sottoposti a 3000 cicli tra 0 e 0,5% di allungamento.

Conclusioni

La conclusione della ricerca in letteratura scientifica, associata alla consapevolezza di ciò che le aziende operanti nel settore dei materiali compositi cercano, è la scelta di sviluppare una soluzione di SHM di tipologia 1D. A questo punto molte strade divergono e la scelta della tecnologia da indagare è ricaduta su quella che:

- è più semplice da produrre fisicamente, con i mezzi a disposizione del laboratorio;
- è la più economica perché utilizza solamente un bundle in fibra di carbonio;
- ha le potenzialità per ottenere risultati precisi e con sensibilità elevata grazie alla elevata piezoresistenza della fibra di carbonio [1].
- è un ottimo punto di partenza per esplorare le tecniche piezoresistive e costruire delle fondamenta sulle quali si possono sviluppare ulteriori ricerche.

Il laminato che verrà prodotto dovrà essere:

- in fibra di vetro da tessuto secco o pre-impregnato;
- dovrà essere “cedevole”, ovvero deve accumulare danneggiamento velocemente in modo da rendere evidente la perdita di modulo elastico.
- dovrà permettere la deposizione di un bundle in fibra di carbonio.

Si è dunque pensato di realizzare un laminato in fibra di vetro con lay-up $[0/90_2]_s$ con un bundle in fibra di carbonio depositato sulle superfici del laminato che funga da rinforzo e allo stesso tempo da sensore piezoresistivo. La scelta del lay-up è dovuta al fatto che sono presenti 4 strati a 90° rispetto all'applicazione del carico che si danneggeranno per primi; contestualmente ci si aspetta una consistente perdita di modulo elastico.

CAPITOLO 3

Laminato GFRP $[0/90_2]_s$ con bundle in fibra di carbonio

Un laminato $[0/90_2]_s$ è stato preparato sovrapponendo 6 strati di pre-impregnato di fibra di vetro (UE400REM - Saati s.p.a.¹³) unidirezionale (UD) nella seguente sequenza $[0/90/90/90/90/0]$.

La scelta di questa configurazione è dovuta principalmente a due motivi:

- Il laminato risultante non sarà molto rigido e perciò si avranno deformazioni elevate;
- Il laminato sarà soggetto ad un test di fatica e negli strati a 90° si formeranno cricche trasversali, che porteranno ad una diminuzione del modulo elastico.

Verso il lato stampo, cioè sotto al primo strato a 0° , sono state depositati dei bundle in fibra di carbonio parallelamente alla direzione delle fibre di vetro e incollate tramite la resina già presente nel pre-impregnato. Successivamente sono stati impilati i quattro strati a 90° e per ultimo il sesto strato a 0° , sopra a quest'ultimo sono state depositate altri bundle in fibra di carbonio, avendo cura di incollarli allineati a quelli depositati sul primo strato a 0° in modo da ottenere un laminato simmetrico. Si noti che le fibre di carbonio incollate sopra allo strato 6 sono lunghe il doppio rispetto a quelle sullo strato 1: servono infatti per avere dei terminali ai quali collegare gli strumenti di misura elettrica (Figura 38).

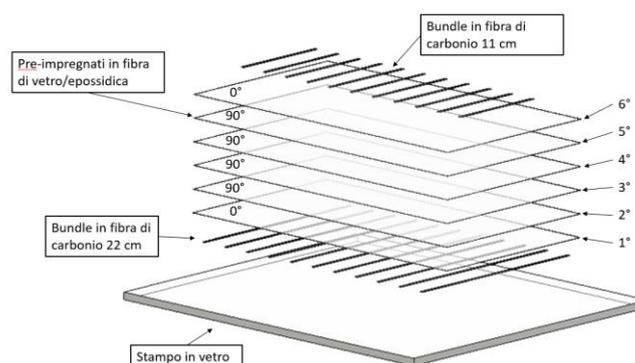


Figura 38 Schema del processo di produzione del laminato in fibra di vetro $[0/90/90/90/90/0]$ con i bundle in fibra di carbonio

¹³ [13]

L'accortezza che bisogna adottare prima di incollare i bundle da 22 cm sull'ultimo strato è quella di posizionare 2 peel-ply sul sesto strato in modo che le estremità delle fibre di carbonio non si incollino al laminato (Figura 39). Successivamente lo stampo è stato inserito in un sacco per il vuoto con del feltro, per assorbire l'eccesso di resina, ed è stata posizionata la valvola per il vuoto.

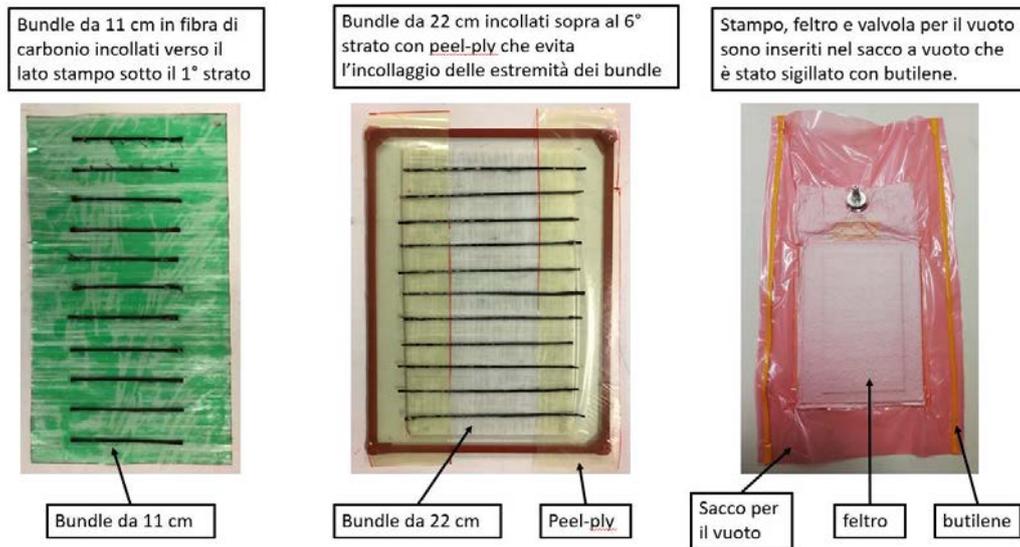


Figura 39 Processo di impilamento degli strati e inollaggio dei bundl in fibra di carbonio.

Il laminato è stato processato con un'autoclave con il ciclo di cottura seguente in Tabella 2 e in Figura 40.

Processo	Temperatura	Pressione (in camera)	Tempo
Attesa vuoto	T_{amb}	p_{amb}	5 minuti
Rampa di riscaldamento	T_{amb} a $100^{\circ}C$	5 bar	15 minuti
Mantenimento	$100^{\circ}C$	5 bar	180 minuti
Raffreddamento	$100^{\circ}C$ a T_{amb}	p_{amb}	45 minuti

Tabella 2 Ciclo di cura del laminato in autoclave

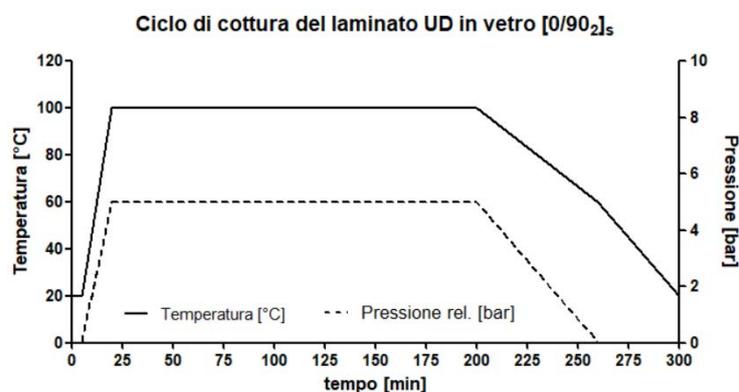


Figura 40 Ciclo di cottura del laminato in autoclave

I provini che si otterranno dal laminato saranno di dimensioni 200x30x2,2 mm circa e sono schematicamente illustrati in Figura 41; nella stessa figura, a sinistra, è mostrato il particolare del laminato in vetro/epossidica dove si vede che le terminazioni dei bundle in fibra di carbonio sono staccate dal laminato.

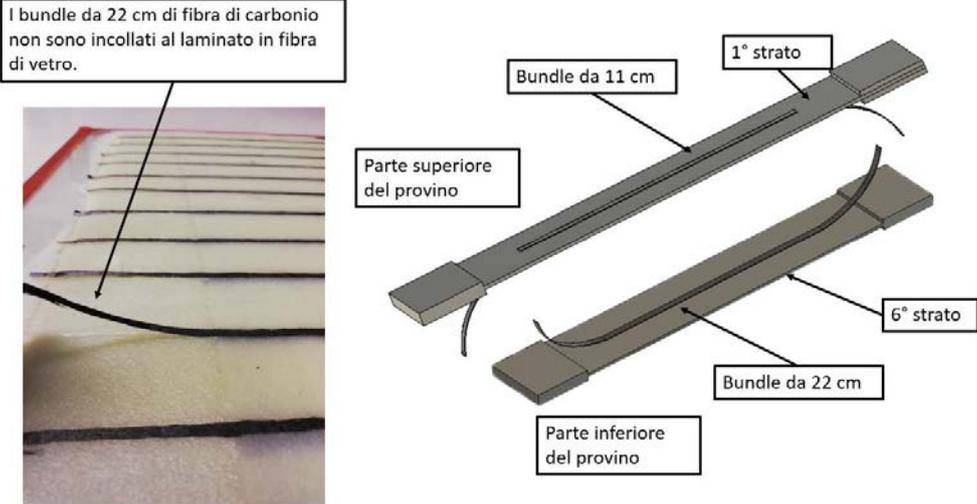


Figura 41 Provini in fibra di vetro [0/90/90/90/90/0] con bundle in fibra di carbonio e tab per la pressa.

Analisi sperimentale preventiva

Prima di procedere con una campagna sperimentale su tutti e dieci i provini ottenuti dal laminato precedente, si è voluto testare un solo provino applicando manualmente una deformazione meccanica di flessione, per misurare se il bundle in fibra di carbonio varia la propria resistenza elettrica ad ogni sollecitazione e con quale intensità.

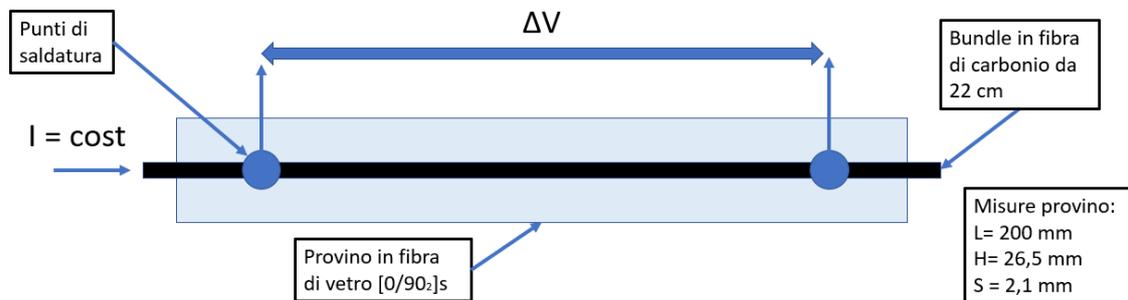


Figura 42 Illustrazione schematica del provino

La prova prevede la misurazione della differenza di potenziale tra due punti sulla fibra di carbonio, mentre dalle terminazioni viene fatta passare una corrente elettrica costante di 10, 50 e 100 mA. Per collegare lo strumento (Source Meter) al bundle si sono inseriti due capocorda per faston sulle terminazioni del bundle e altri due capocorda in alluminio al di sotto ai faston, che serviranno per saldare due connettori per misurare la differenza di potenziale (Figura 43).

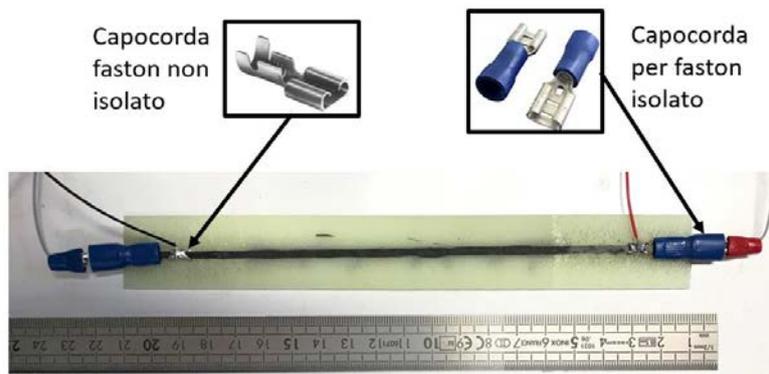


Figura 43 Connessioni elettriche dal provino allo strumento di misura Source Meter

Lo strumento campiona ogni 200 ms la differenza di potenziale e mantiene costante la corrente elettrica. Utilizzando la 1^a legge di Ohm ($R = \Delta V / I$) è possibile calcolare la resistenza istantanea della fibra di carbonio e creare dei grafici che mettono in relazione la resistenza elettrica (Ω) e il tempo di campionamento (ms).

I grafici che si ottengono per le diverse intensità di corrente sono i seguenti:

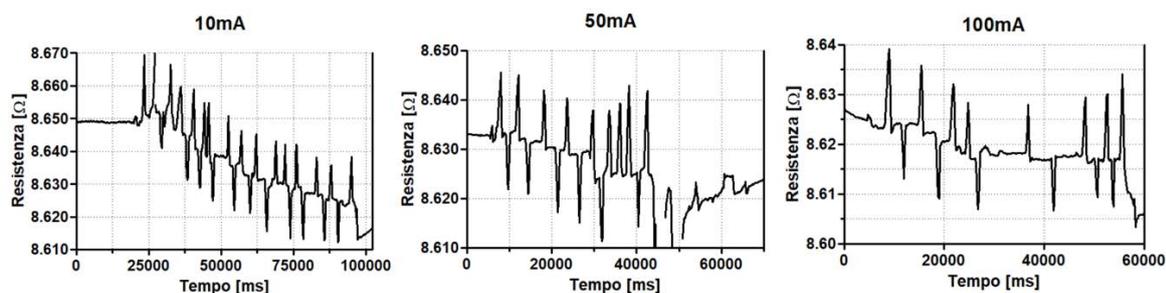


Figura 44 Grafici che correlano la resistenza elettrica al variare del tempo di campionamento. Da sinistra a destra viene aumentata la corrente elettrica.

Dai grafici si possono vedere i picchi e le valli della resistenza elettrica dovuti alla deformazione di flessione, positiva e negativa, indotta manualmente sull'intero provino. La variazione di resistenza è entro i centesimi di Ohm, pertanto è necessario uno strumento molto sensibile per valutarne la variazione.

Durante la prova si nota dal grafico una diminuzione globale della resistenza dopo ogni deformazione, sebbene ad ogni prova con corrente maggiore la resistenza della fibra riparta da un valore più alto rispetto al valore di termine della prova precedente.

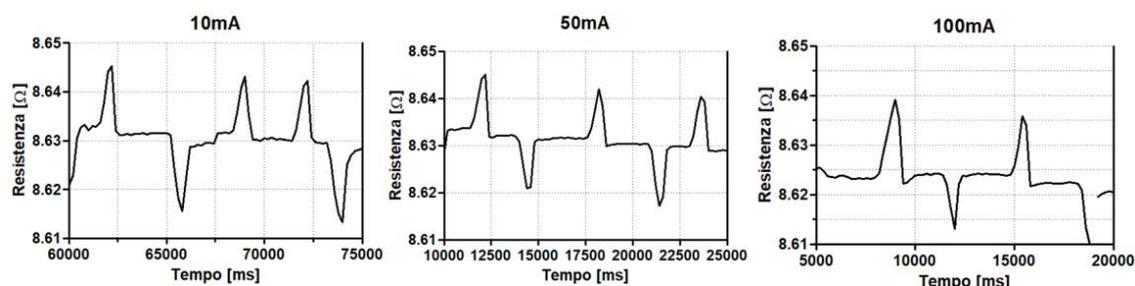


Figura 45 Ingrandimento del grafico precedente (Figura 44)

Da una constatazione puramente visiva, dal grafico in Figura 45, si può notare che il segnale di resistenza elettrica con una corrente di 50 mA sembra essere meno affetto da rumore e le rampe di salita e di discesa sono più definite rispetto ai grafici con corrente di 10 mA o 100 mA.

Una ulteriore prova è stata condotta anche facendo passare una corrente di 1 A, ma i contatti e i fili in rame utilizzati erano troppo sottili e i connettori hanno cominciato a riscaldarsi per effetto Joule, quindi la prova è stata interrotta.

Prova sperimentale: flessione a 3 punti

Visto il successo della prova preliminare sul laminato $[0/90_2]_s$ con il bundle di fibra di carbonio del capitolo precedente si è proceduto con una prova di flessione a 3 punti. Lo scopo di questa prova principalmente serve a stabilire due parametri:

1. Calcolare il Gauge Factor del bundle in fibra di carbonio in flessione;
2. Constatate la presenza di isteresi nel bundle.

Una doverosa precisazione è necessario farla riguardo il calcolo del Gauge Factor, in quanto la distribuzione del momento flettente lungo il provino è lineare con il massimo in mezzeria; la deformazione ϵ varia linearmente nella sezione del provino da ϵ_{\max} a $-\epsilon_{\max}$ e, pertanto, il Gauge Factor calcolato in questo paragrafo vale per la sola flessione (Fig.36). Essendo il bundle spesso circa 0,2 mm è ipotizzabile che sia del tutto soggetto alla stessa deformazione, ma è massima solo in mezzeria e diminuisce verso i vincoli pertanto in trazione il Gauge Factor sia maggiore.

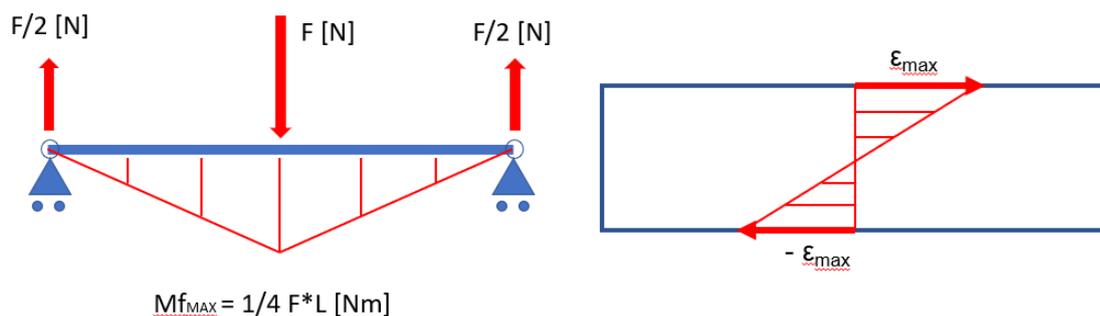


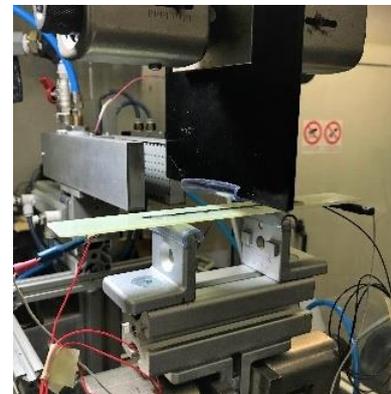
Figura 46 Schema flessione a 3 punti: andamento del momento flettente e della deformazione lungo lo spessore.

La prova è stata condotta per mezzo di una pressa idraulica in controllo di spostamento. Di seguito si riportano i dati essenziali per la prova di flessione a 3 punti.

Pressa idraulica	Hypersigma 20 KN
Acquisitore dei dati (DAQ)	Keithley Source Meter 2600B
Sensore di spostamento [mm]	LVDT sul pistone idraulico
Sensore di forza [N]	Load-cell 20 KN HBM u2b
Distanza appoggi [mm]	65

Tabella 3 Dati della pressa per trazione e dati della prova

I contatti dai quali viene immessa la corrente elettrica e prelevata la tensione non risentono di deformazione e sono quindi scarichi da ogni tipo di sollecitazione, pertanto non perturbano i valori di resistenza elettrica durante la prova. Sono state



impostate 3 rampe di salita e discesa, in controllo di spostamento, tra 0 e 5 mm in 120 secondi, quindi la velocità di deformazione $\dot{\epsilon}$ è fissata a 2,5 mm/min.

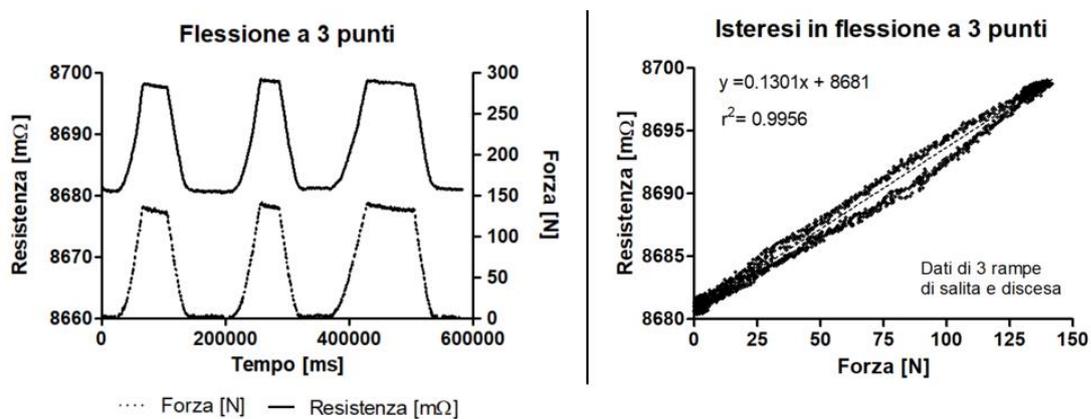


Figura 47 A sinistra: Rampe di salita e discesa in controllo di deformazione da 0 a 5 mm di freccia in mezzeria. A destra: Isteresi nel comportamento del bundle tra saliti e discesa.

Dalle rampe (Figura 47) si nota che la variazione di resistenza segue il profilo della forza registrata dalla cella di carico e la variazione di resistenza è dell'ordine di 20 mΩ per 300 N di forza massima applicata. Si può anche notare che il bundle ha un comportamento differente tra salita e discesa, quindi è presente una isteresi di comportamento, anche se di piccola entità (Figura 48).

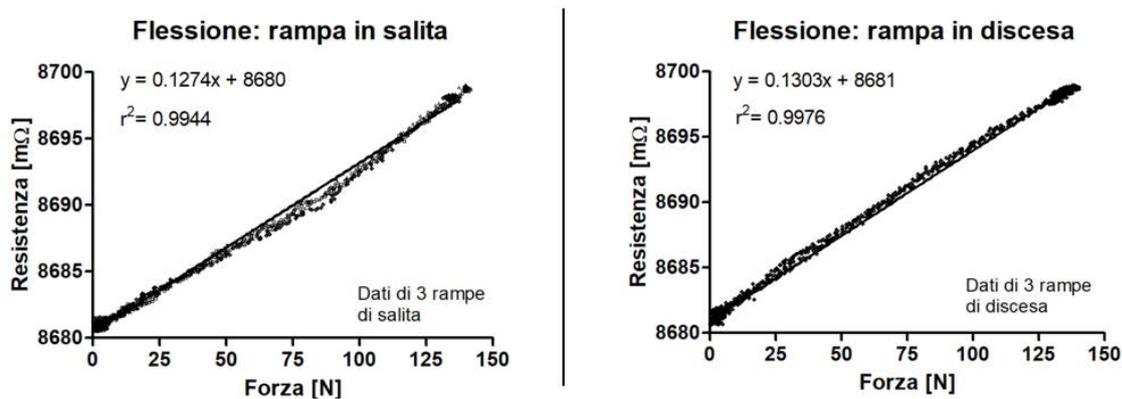


Figura 48 Rampe di salita e discesa separate per mostrare il diverso comportamento del bundle.

Visto e considerato che la differenza di pendenza della retta interpolante delle rampe di salite rispetto a quelle di discesa è del 2,27%, nei prossimi grafici non si considera questa diversità nel comportamento.

Calcolo del GF in flessione a 3 punti

Per calcolare il Gauge Factor del bundle in flessione è necessario misurare la deformazione e metterla in relazione con la variazione di resistenza elettrica del bundle. Si definiscono le seguenti grandezze:

- Gauge Factor $GF = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\delta R}{\delta \varepsilon}$
- Variazione di resistenza elettrica $\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0}$

Per calcolare la deformazione del bundle in flessione non è possibile utilizzare i dati del sensore LVDT poiché il sensore misura anche le deformazioni dello stelo del pistone, dei supporti e dei gommini dove il provino appoggia. Si è deciso quindi di procedere ad un calcolo della deformazione massima in mezzeria tramite le equazioni che saranno mostrate qui di seguito.

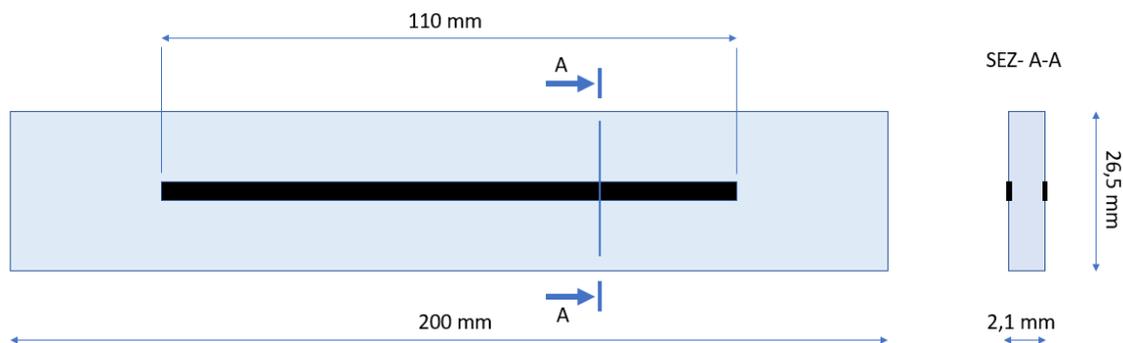


Figura 49 Geometria del provino P1.

Le proprietà di materiale sono solitamente calcolate nel sistema di riferimento del materiale secondo le formule seguenti:

- Direzione 1 \rightarrow Rule of mixture $E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$
- Direzione 2 \rightarrow Halpin-Tsai $E_2 = E_m \left(\frac{1 + \eta \xi V_f}{1 - \eta V_f} \right)$
- Direzione 12 e 31 \rightarrow Halpin-Tsai $G_{12} = G_{31} = G_m \left(\frac{1 + \eta \xi V_f}{1 - \eta V_f} \right)$
- Direzione 12, 23 e 31 \rightarrow Halpin-Tsai $G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})}$

Le proprietà utilizzate nei seguenti calcoli fanno riferimento ad uno studio avvenuto precedentemente [2], nel quale è stato utilizzato lo stesso materiale e quindi le

proprietà meccaniche della lamina UD pre-impregnata in fibra di vetro sono le seguenti mostrate in Tabella 4.

Tabella 4 Proprietà di una lamina UD pre-preg in fibra di vetro con $V_f = 42\%$. Fonte dei dati: [2]

Materiale	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	G12 [MPa]	G23 [MPa]	G31 [MPa]	v12	v23	v31
Vetro E/Epoxy	34860	9419	9419	3193	3488	3193	0.326	0.35	0.326
Carbonio T300/Epoxy	139400	17614	17614	5719	6524	5719	0.3	0.35	0.3

Per le altre due direzioni, rispettivamente 23 e 31, sono stati fissati dei valori standard del modulo di Poisson di altri laminati UD in fibra di vetro ed epossidica; in particolare per la direzione 23 si sono utilizzate le seguenti relazioni:

- $\nu_{23} = 0,35 \div 0,4$
- $G_{23} = \frac{E_3}{2(1+\nu_{23})}$.

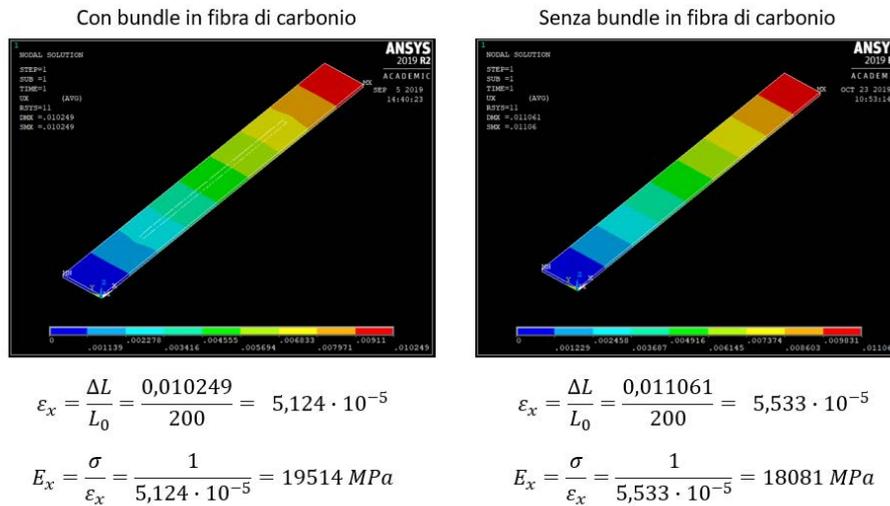
È necessario considerare anche il contributo del bundle perché la rigidità della fibra di carbonio è un ordine di grandezza maggiore rispetto al vetro nella direzione 1, inoltre il bundle è posizionato sulla superficie superiore e inferiore del laminato, che in flessione porta un contributo sicuramente non indifferente. Quindi per il calcolo del modulo elastico in direzione x (direzione parallela al bundle), che corrisponde alla direzione 0° delle fibre del laminato $[0/90_2]_s$, si è utilizzato il metodo agli elementi finiti (FE) con il programma ANSYS Mechanical APDL.

La modellazione del provino è stata pensata in questo modo:

- Divisione in volumi del provino e mesh con Solid Layered 185 a 8 nodi
- Sovrapposizione di elementi Shell 181 a 4 nodi, per coerenza con il Solid layered a 8 nodi, per simulare la presenza del bundle in fibra di carbonio.

Al provino, vincolato ad una estremità, si è applicato 1 MPa sull'area trasversale per simulare una prova di trazione; Dal menu General Post-processor è ricavato il

massimo spostamento in direzione x dovuto alla tensione applicata. L'analisi è stata ripetuta eliminando il contributo del bundle e di seguito si riportano i risultati.



$$\Delta E_x = 7,34 \%$$

Figura 50 Immagini della modellazione della geometria in ANSYS. Modello tridimensionale, mesh con elementi SOLID LAYERED e SHELL, orientazione del sistema di coordinate secondo la direzione delle fibre, risultati della deformazione lungo x.

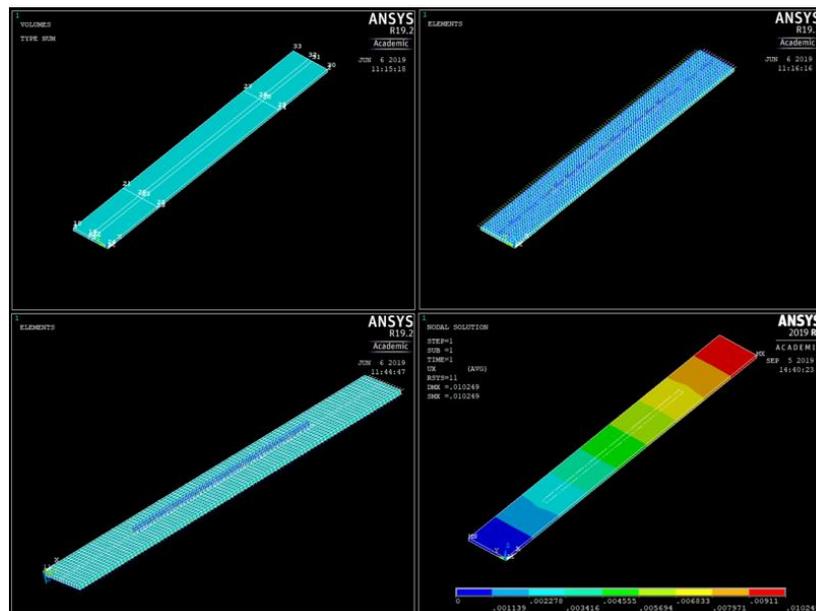


Figura 51 Immagini della geometria del modello FEM utilizzato per calcolare il modulo elastico E_x con e senza bundle.

Dalla analisi FEM, mostrata precedentemente, il contributo che il bundle in fibra di carbonio dà alla rigidità è di circa il 7% e non è trascurabile. Si osserva come un piccolo volume di fibre di carbonio dia un contributo notevole alla resistenza.

Per considerare il contributo della fibra di carbonio, utilizzando la *classic lamination theory*, si è diviso in 2 laminati il provino a singolo bundle, in modo tale da calcolare

una matrice $[D_{eq}]$ equivalente. Il modo in cui la matrice equivalente è stata calcolata è basato sulla media ponderata sul volume occupato dal laminato senza bundle rispetto a quello con bundle (Figura 52). L'ipotesi che si fa è che il bundle sia interamente sottoposto alla deformazione massima in mezzeria, quindi il GF che si calcola in questo modo risulterà maggiore di quello reale misurabile in trazione. Il calcolo è stato fatto per avere una informazione sull'ordine di grandezza del GF per un bundle di fibre di carbonio, non potendo eseguire un test di trazione a causa dei contatti che interferivano con le grip della pressa.

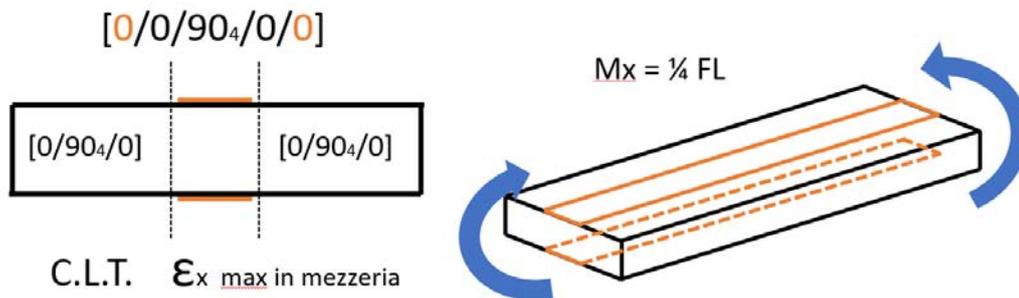


Figura 52 Schema di suddivisione del laminato a singolo bundle e applicazione dei carichi.

Siccome il laminato $[0/90_2]_s$ è simmetrico e ortotropo, tramite la Classic Lamination Theory è possibile calcolare in modo disaccoppiato le deformazioni dovute ai carichi assiali e deformazioni dovute ai momenti flettenti, perché la matrice $\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}$ ha la particolarità di avere i termini $[B_{ij}]$ nulli.

Quindi il sistema di equazione matriciale si trasforma in questo modo:

$$- \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \epsilon_{x0} \\ \epsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{pmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ D_{61} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{pmatrix}$$

Dal momento in cui il provino è sottoposto solamente a un momento flettente che ruota attorno all'asse y, il vettore delle forze sul piano xy è nullo $(N) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ e il vettore

dei momenti assume questa forma $(M) = \begin{pmatrix} M_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Il momento flettente applicato sarà variabile da 0 a $M_{x \max}$ poiché la prova è stata condotta con una forza variabile da 0 a 150 N. Il calcolo del momento flettente è stato fatto utilizzando questa formula:

$$- M_x = \frac{\left(\frac{1}{4} \cdot F \cdot L\right)}{b_{\text{laminato}}} \quad \left[\frac{N \cdot mm}{mm} \right] \quad b = \text{larghezza provino} = 26.5 \text{ mm}$$

Dove F sarà un vettore colonna costituito da 21912 righe, pari al numero di punti campionati dalla cella di carico della macchina, contenenti le 3 rampe di salita e discesa che sono state eseguite durante la prova di flessione a 3 punti. Con il linguaggio di programmazione Matlab si è scritto il seguente codice.

```

%% Definizione della matrice [Dij]
M = [0;0;0];
L = 65;
D = [3.1388e4, 2.935e3, 0 ;
     2.935e3, 1.55496e4, 0 ;
     0, 0 , 2.529e3];
% Calcolo della deformazione
for i=1:2912
    M=[((1/4)*F(i)*L)/26.5;0;0]; % momento flettente massimo in mezzeria
    Kv(:, :, i)=inv(D).*M; % matrice tridimensionale delle curvatures
    ev(:, :, i)=Kv(:, :, i)*1.1; % matrice tridimensionale delle deformazioni
    ex(:, i)=ev(1,1,i); % vettore riga degli spostamenti lungo x
    ext=ex';
end

plot(100*ext,R, '.');
xlabel('\epsilon_x [%]');
ylabel('\Delta R / R_0 [%]')

```

Figura 53 Codice Matlab per il calcolo della deformazione massima in mezzeria

Il calcolo restituisce il vettore delle deformazioni lungo la direzione x dovuto al solo momento flettente massimo in mezzeria al provino; il grafico che se ne ricava, unendo i dati della resistenza elettrica, è il seguente e il Gauge Factor che si ricava è 0,6856. Il GF calcolato nell'articolo [1] per la fibra di carbonio in trazione risulta 0,158.

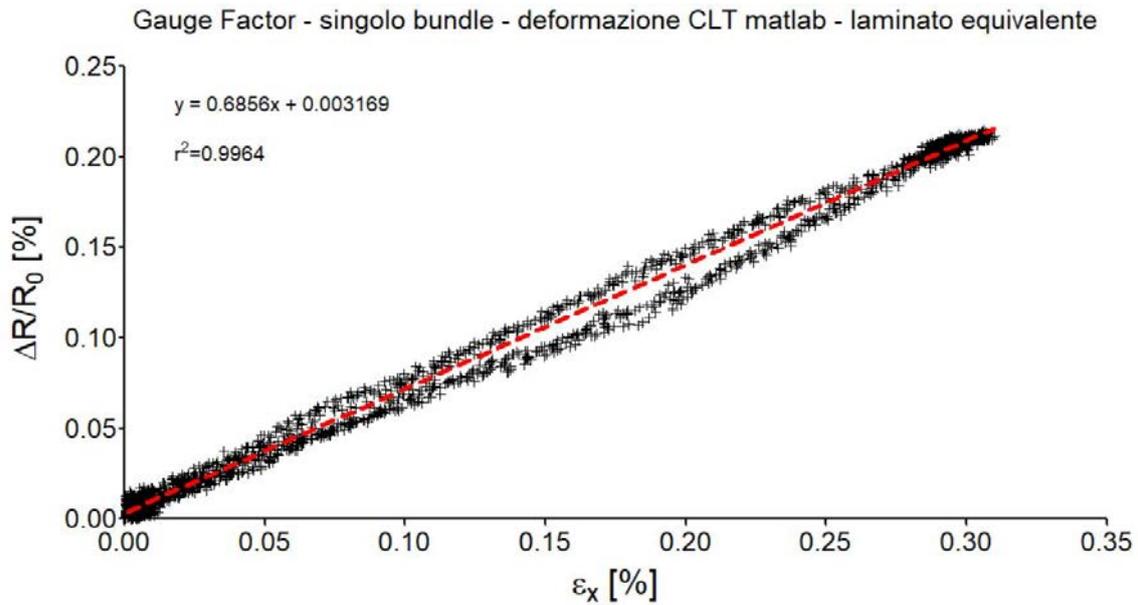


Figura 54 Calcolo del GF, grafico che mette in relazione la variazione di resistenza percentuale e la deformazione massima in mezzeria sulla superficie del provino.

Il Gauge Factor calcolato minore rispetto a quelli che si può trovare in alcuni estensimetri commerciali, ma è ben leggibile anche da uno strumento di acquisizione segnali meno costoso con un ADC da 12-16 bit.

Tabella 5 Alcuni valori tipici di Gauge Factor per estensimetri già presenti sul mercato.

MATERIALE	Gauge Factor
Estensimetro a foglio metallico	2-5
Film sottili di metallo	2
Single crystal - Silicio	-125 to + 200
Polysilicon	±30
Resistori a film spesso	100
Semiconduttori (Ge, Si) p-n type	102

Validazione del Modulo elastico ottenuti da analisi FE attraverso prove sperimentali

I risultati che l'analisi FE fornisce sono strettamente legati alle proprietà dei materiali che si inseriscono nel programma e dal tipo di modello geometrico che si costruisce. Per valutare l'errore sul modulo elastico sono state condotte tre prove di trazione su 3 provini $[0/90_2]_s$ con singolo bundle in fibra di carbonio sulle due facce opposte (Figura 43); in questo modo è possibile calcolare il modulo elastico in direzione x corretto, nel sistema di riferimento di struttura, e capire se l'analisi precedente si può ritenere affidabile.

I seguenti grafici mostrano le prove di trazione effettuate sui laminati denominati P1, P2 e P3 (Figura 55); per calcolare il modulo elastico in direzione parallela al carico, è stato necessario considerare solamente i dati che vanno da 0 a 100 MPa poiché fino a questo valore il laminato ha un comportamento lineare elastico (Figura 56). Per essere più conservativi sono stati considerati solamente i dati fino a 50 MPa.

Tabella 6 Dimensioni geometriche dei provini P1, P2 e P3 a singolo bundle in fibra di carbonio.

Provino	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Dist. Tab [mm]
P1	200	22,5	2,2	132,5
P2	200	22,5	2,2	132,5
P3	200	23,7	2,2	133



Figura 55 Da sinistra a destra: Set- up della macchina con estensimetro, provino rotto dopo la prova di trazione, provini rotti dopo le prove di trazione.

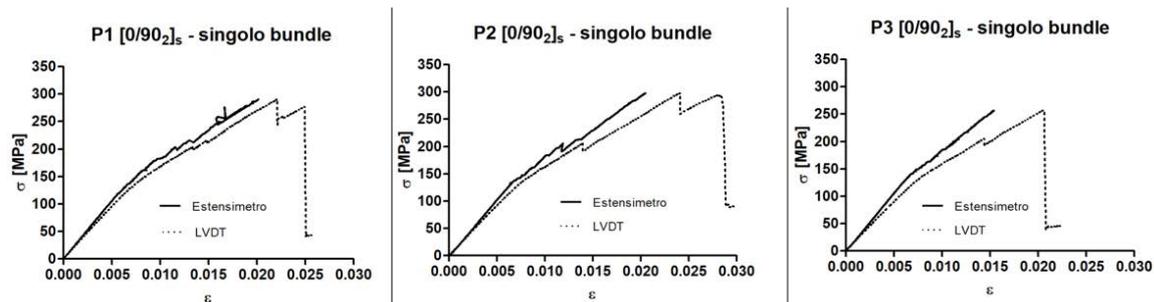


Figura 56 Grafici σ/ϵ della prova di trazione per i 3 provini P1, P2 e P3. Le due curve distinte nei grafici si riferiscono ai dati di deformazione ϵ forniti dall'estensimetro e dal sensore LVDT della macchina.

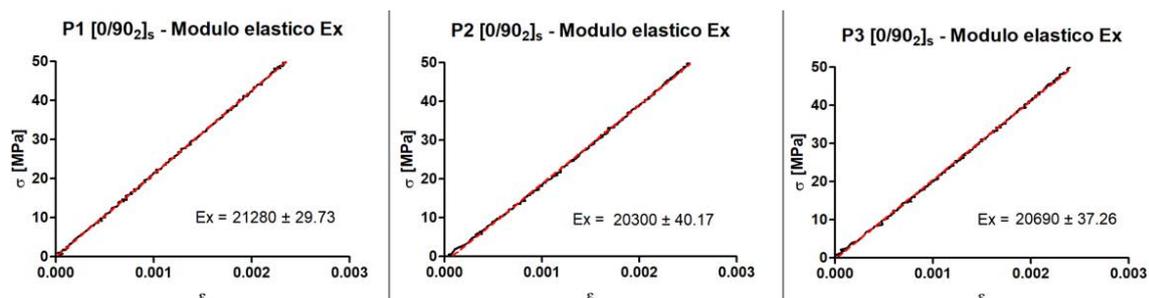


Figura 57 Grafici per il calcolo del Modulo Elastico E_x . I dati sono dell'estensimetro e sono in campo elastico lineare.

Mediamente, dai grafici in Figura 57, il modulo elastico E_x assume valor medio di 20757 MPa con un errore medio di 35,72 MPa per il laminato in fibra di vetro [0/90₂]_s con singolo bundle in fibra di carbonio; rispetto alla soluzione data dal modello Ansys, il modulo elastico reale è maggiore del 6,4% circa.

Prova sperimentale: trazione

Assieme alla prova di flessione a 3 punti si è voluto anche testare il provino a trazione per acquisire il segnale di variazione di resistenza elettrica del bundle in carbonio. La pressa utilizzata è la medesima e anche il sistema di acquisizione rimane lo stesso del precedente test in flessione a 3 punti.

Una precisazione è d'obbligo: i provini a singolo bundle sono stati realizzati per un test preliminare per capire se la fibra di carbonio ha un effetto piezoresistivo sufficientemente sensibile per essere letto da uno strumento di acquisizione dati, pertanto in questo caso i contatti saranno soggetti al carico di trazione e la misura della resistenza elettrica risente anche della deformazione dei contatti stessi. Nel prossimo capitolo saranno realizzati dei provini dove questo problema è stato risolto. Il provino utilizzato è lo stesso illustrato in Figura 43 e schematizzato in Figura 49.

Per misurare la variazione di resistenza elettrica si sono impostate 3 rampe di carico e scarico in questo ordine:

- Da 0 a 50 N;
- Da 0 a 300N;
- Da 0 a 500 N.

Si sono costruiti i grafici che riportano la resistenza elettrica sovrapposti alle rampe di trazione impostate nella pressa in controllo di carico (Figura 58).

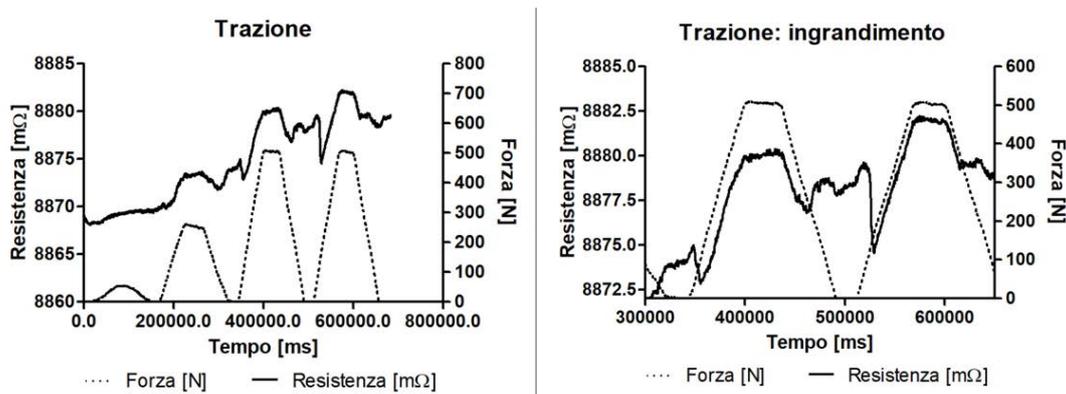


Figura 58 Grafici Resistenza/tempo e Forza/tempo sovrapposti per vedere l'andamento

A causa dei contatti che vengono deformati durante la prova il segnale risulta disturbato e le rampe di resistenza elettrica, anche se seguono quelle della forza, non sono molto chiare e correlabili. La conclusione è che il bundle è sensibile alla deformazione imposta dalle rampe di carico, ma i contatti che si deformano causano molto disturbo nella lettura della resistenza elettrica.

Conclusioni: prova di flessione a 3 punti e prova di trazione

Gli aspetti positivi delle due prove sperimentali precedenti sono i seguenti:

- Il bundle in fibra di carbonio è sufficientemente sensibile da poter essere letto da un acquirente di dati;
- Il segnale elettrico di resistenza non presenta disturbi o oscillazioni durante la lettura ed è stabile;
- La corrente immessa è di 50 mA (D.C. $\overleftarrow{=}$) e non presenta pericolo di elettrocuzione, in quanto il bundle è isolato dall'esterno per mezzo della resina.

Gli aspetti negativi sono i seguenti:

- Variazione di resistenza del bundle molto piccola (20 m Ω) e confondibile con la resistenza di contatto (circa 1-2 Ω);
- Nella prova di trazione i contatti si deformano e il segnale è disturbato, è necessario riprogettare il provino.

Per risolvere gli aspetti negativi nel prossimo capitolo si interverrà con alcune modifiche sia al bundle in fibra di carbonio che al sistema per creare dei terminali che non siano soggetti a deformazione durante la prova di trazione. Le modifiche apportate sono le seguenti:

- Aumentare la lunghezza del bundle da 22 cm a 90 cm circa. L'allungamento del bundle comporta un sensibile aumento di resistenza che passa da circa 8 Ω a quasi 100 Ω ;
- Le terminazioni del bundle sono prive di resina, così da ridurre ulteriormente la resistenza di contatto e rendere flessibili i collegamenti.

Il modo in cui queste modifiche sono state applicate ai nuovi provini è interamente spiegato nel prossimo capitolo.

CAPITOLO 4

Laminato GFRP [0/90₂]_s con griglia in fibra di carbonio

In questo capitolo si descriverà un nuovo provino in fibra di vetro UD con lay-up [0/90₂]_s sul quale è presente una griglia costituita da un bundle di fibra di carbonio lungo circa 1 metro.

Si sono considerate 2 figure geometriche per formare il sensore estensimetrico costituito dal bundle, le quali sono:

1. Spirale: sensore che permette di avere una forma compatta e che può misurare deformazioni multi-assiali¹⁴;
2. A griglia: sensore che può misurare deformazioni mono assiali precisamente, ma può anche misurare la tensione perpendicolare all'asse del sensore.

Durante la deposizione manuale del bundle sul laminato sono però sorte delle problematiche legate alla deposizione manuale e ai raggi di piega del bundle stesso. Dalla Figura 59 si può infatti vedere che la spirale rilascia fibre di carbonio che vanno ad interagire tra loro, rendendo vana la forma stessa, poiché la corrente elettrica troverà il percorso più breve e non quello imposto dalla intera spirale; la configurazione a griglia invece è più semplice da posizionare senza commettere errori e sfilacciare il bundle.

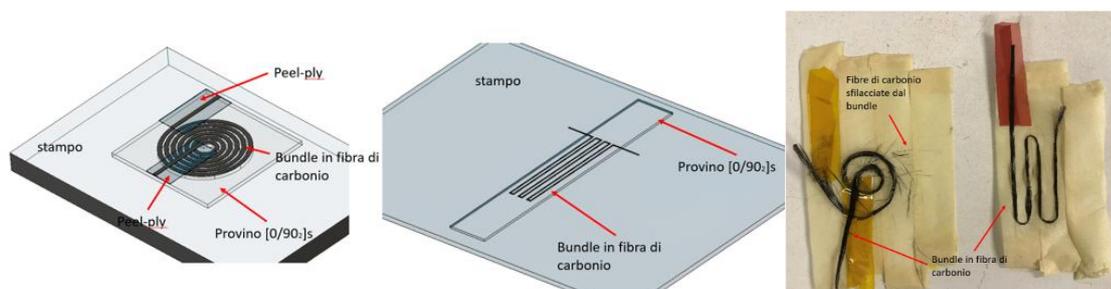


Figura 59 Da sinistra a destra: sensore a spirale, a griglia estensimetrica e prova di deposizione del bundle.

Il laminato è del tutto simile al precedente (CAPITOLO 3), l'unica modifica sta nella deposizione del bundle a forma di griglia estensimetrica; la deposizione è stata effettuata manualmente, avendo l'accortezza di non far toccare le fibre di carbonio tra loro.

¹⁴ [3]

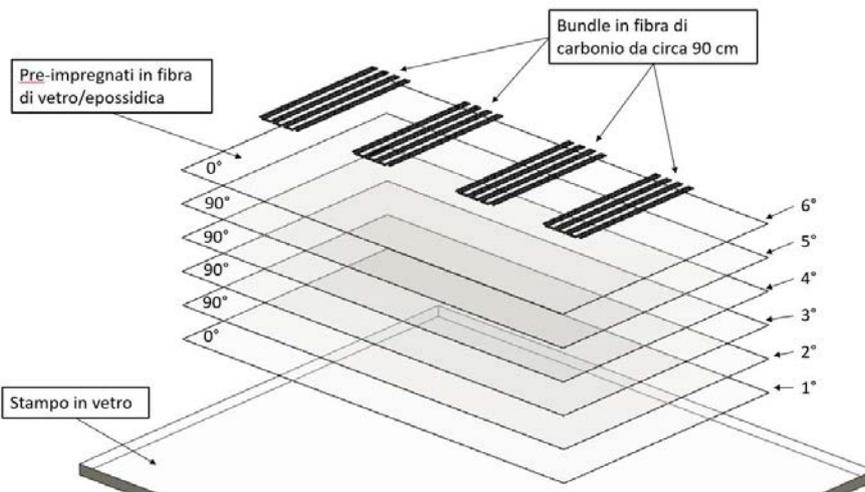


Figura 60 Schema di costruzione del laminato con sensori in fibra di carbonio a forma di griglia estensimetrica.

I bundle, da circa 1 metro di lunghezza e circa 3 mm di spessore, sono stati ricavati da un tessuto secco UD in carbonio; per evitare che le terminazioni del bundle si impregnassero di resina si sono applicate due strisce di peel-ply sotto le due estremità e sopra alla griglia.

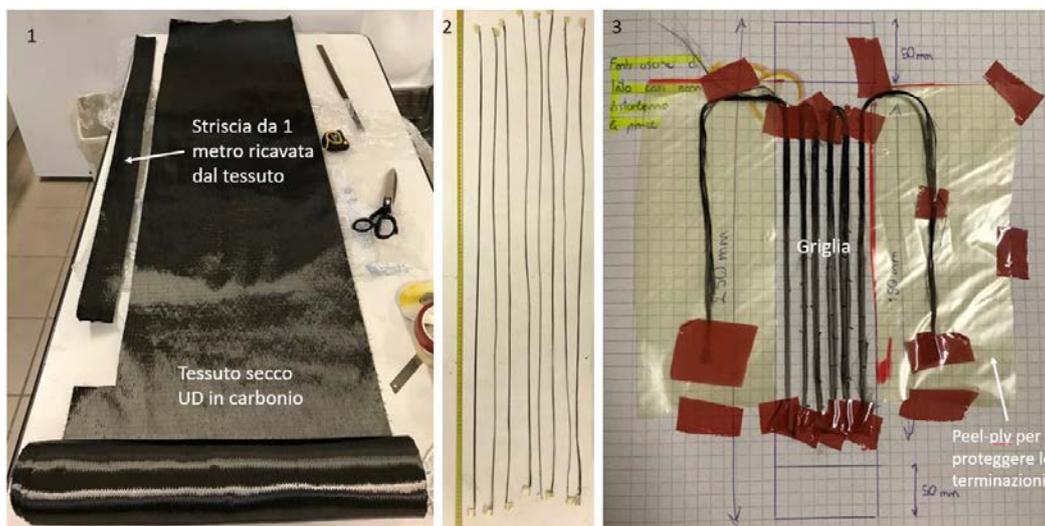


Figura 61 Procedura per ricavare i bundle di fibra di carbonio e prova di deposizione con peel-ply per proteggere le terminazioni dalla resina.

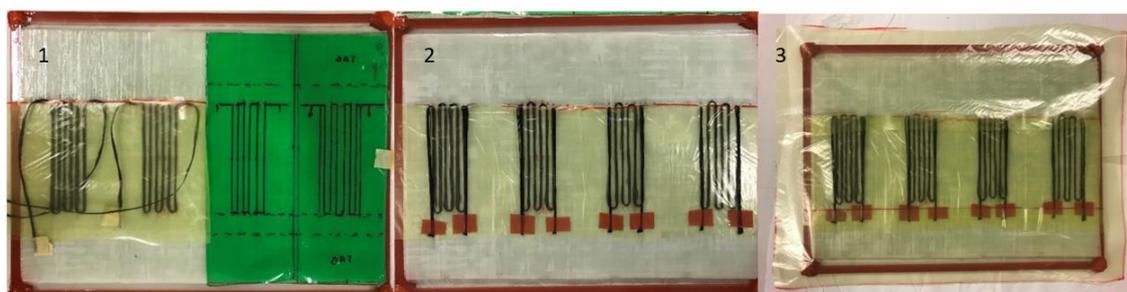


Figura 62 Procedura di deposizione del bundle sul 6° strato della lamina UD pre-preg in fibra di vetro.

Il ciclo di cura del laminato in autoclave è il medesimo del precedente (CAPITOLO 3, Figura 40). Successivamente alla cura in autoclave i provini sono stati tagliati e cablati per eseguire le misure elettriche come per i precedenti provini (Figura 64).



Figura 63 Provini con bundle a griglia estensimetrica con tab alle estremità

La precisazione che si vuole mettere in evidenza è che il laminato ottenuto non è simmetrico e presenta una curvatura convessa verso il lato del provino dove è presente il bundle. Questo comportamento è del tutto previsto dalla CLT (*Classical Lamination Theory*). Tale curvatura porta ad un pretensionamento del bundle e quindi ad una resistenza elettrica maggiore, infatti durante le prove di fatica si vedrà una progressiva diminuzione della resistenza elettrica del bundle (Figura 68).

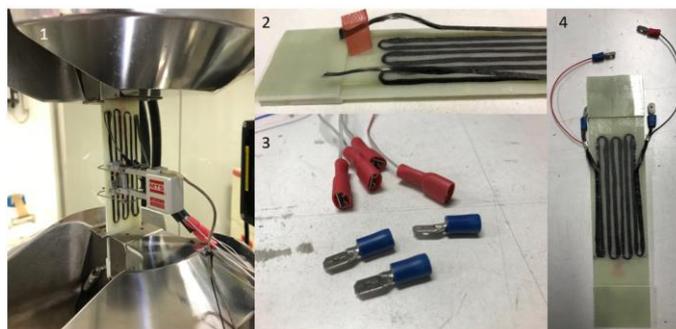


Figura 64 (1) Set-up pressa con estensimetro e collegamenti al Source meter. (2) Terminali del bundle non impregnati dalla resina. (3-4) Cablaggio dei provini con connettori Faston.

Sono state eseguite tre prove di trazione cicliche in campo elastico lineare, ovvero al di sotto dei 100 Mpa (limite determinato per mezzo delle prove del laminato precedente Figura 56). I tre provini denominati G1, G2 e G3 hanno le seguenti misure. Il provino G4 non è stato testato in queste prove.

Tabella 7 Dimensioni geometriche dei provini G1, G2, G3 e G4

Provino	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Dist. Tab [mm]
G1	235	41	2,2	181
G2	226	49,4	2,2	152
G3	228	43,9	2,2	186

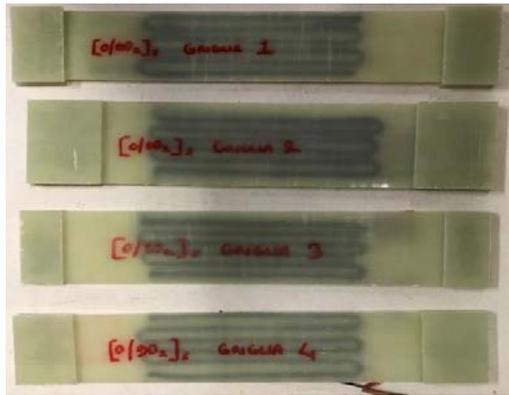


Figura 65 Provini G1, G2, G3 e G4

Sono state impostate le sinusoidi di carico da 0 a 8000 N, con frequenza di 0,1 Hz. Di seguito si mostrano i blocchi di carico per i tre provini, il calcolo del modulo elastico e i grafici di variazione di resistenza elettrica rispetto alla deformazione, entrambi espressi in percentuale.

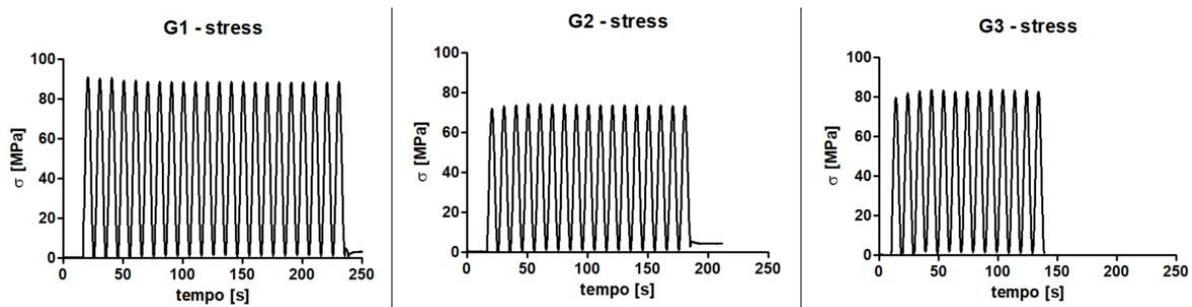


Figura 66 Blocchi di carico per ogni provino testato

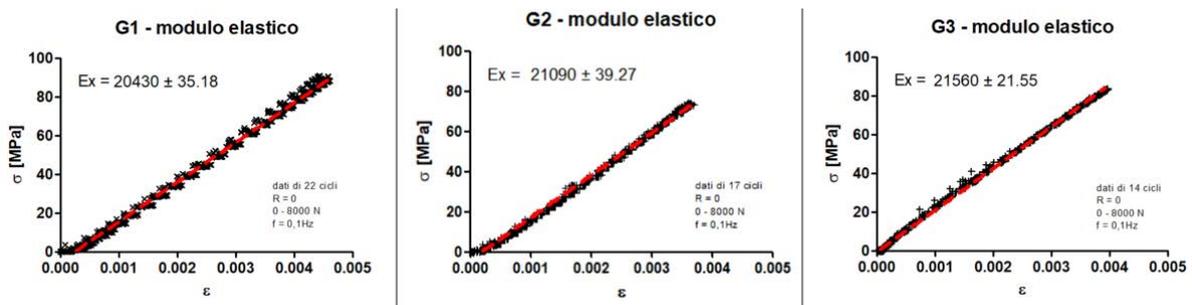


Figura 67 Modulo elastico dei provini, calcolato con cicli da 0 a 8000 N in campo elastico lineare.

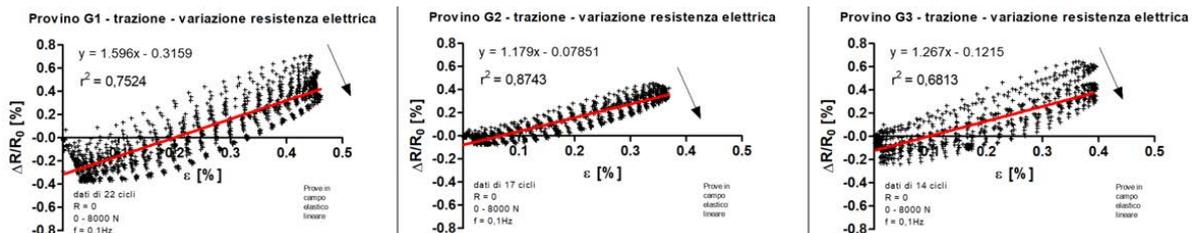


Figura 68 Variazione di resistenza percentuale rispetto alla deformazione del provino. La pendenza della retta è il Gauge Factor. Il fit lineare si può intendere come la media tra tutti i cicli di sollecitazione.

Dai grafici in Figura 68 si nota che ad ogni ciclo di carico e scarico dei provini la resistenza relativa percentuale diminuisce. Due ipotesi sono al vaglio:

- L'allineamento progressivo delle fibre di carbonio nel bundle imposto dalla deformazione del laminato comporta un più efficiente percorso per la corrente elettrica e quindi una diminuzione della resistenza elettrica¹⁵;
- Il laminato non è simmetrico ed è convesso dalla parte del bundle. Ad ogni trazione il laminato si riallinea (danneggiandosi) e il percorso che la corrente deve fare è più breve, con una conseguente diminuzione di resistenza elettrica.

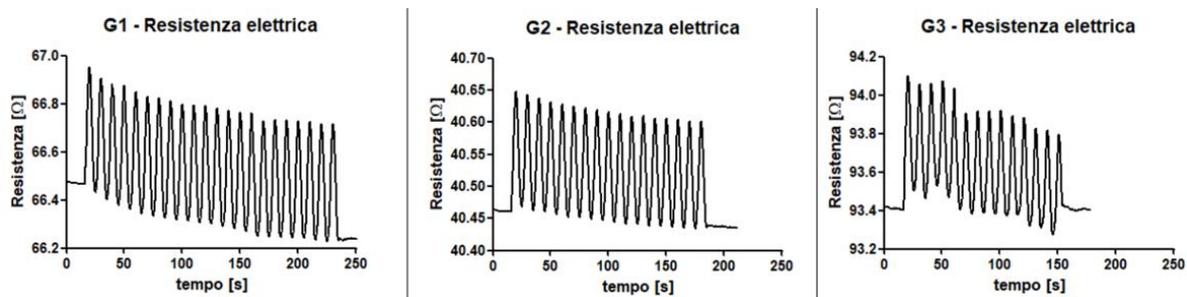


Figura 69 Variazione della resistenza elettrica nel tempo.

All'aumentare della deformazione infatti la resistenza elettrica diminuisce progressivamente (Figura 69). Se si indaga sull'ampiezza del segnale della resistenza elettrica si può notare che essa aumenta ad ogni ciclo (Figura 71).

Secondo i grafici della deformazione del provino (Figura 70), rilevata dall'estensometro della pressa, la deformazione non ritorna a zero; quindi anche se la tensione applicata è all'interno del campo elastico lineare del laminato, il provino sta accumulando deformazione, sintomo che il laminato si sta lentamente danneggiando (probabili cricche trasversali, delaminazione).

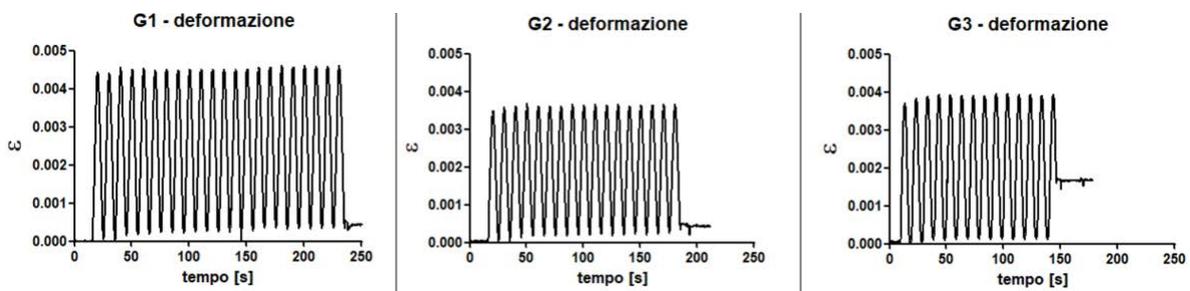


Figura 70 Deformazione dei provini rilevata dall'estensimetro montato sui provini.

¹⁵ [16]

Prove di fatica

Considerato che i grafici della deformazione suggeriscono un danneggiamento progressivo si è condotta una prova di fatica da 1000 cicli sul provino G1. La prova è stata condotta in questo modo:

- Blocco di carico da 200 cicli da 0 a 8000N a 5 Hz senza effettuare misurazioni;
- Blocco di carico da 5/6 cicli da 0 a 8000 N a 0,1 Hz di carico applicato e acquisizione di deformazione, forza e resistenza elettrica;

Osservando nuovamente il grafico della resistenza elettrica del bundle (Figura 71) del provino G1 si può notare che il range (Max(R)-Min(R)) per ogni blocco di carico continua ad aumentare. Per effetto piezoresistivo ciò significa che il provino si deforma maggiormente ad ogni blocco di carico e siccome la pressa è in controllo di carico (da 0 a 8000 N), per l'equazione di Hooke ($\sigma = \varepsilon \cdot E$), l'unico modo perché l'equazione risulti verificata è che il modulo elastico (E_x) diminuisca.

Nei materiali compositi il Modulo elastico può modificarsi a causa delle cricche trasversali e della delaminazione. Considerando per ogni blocco di carico solamente le rampe di salita è possibile calcolare il Modulo elastico in direzione dello sforzo applicato (E_x), inoltre è possibile calcolare anche l'ampiezza ($A = \frac{MAX(R)-MIN(R)}{2}$) del segnale di resistenza elettrica e correlarli assieme nel grafico seguente (Figura 72)

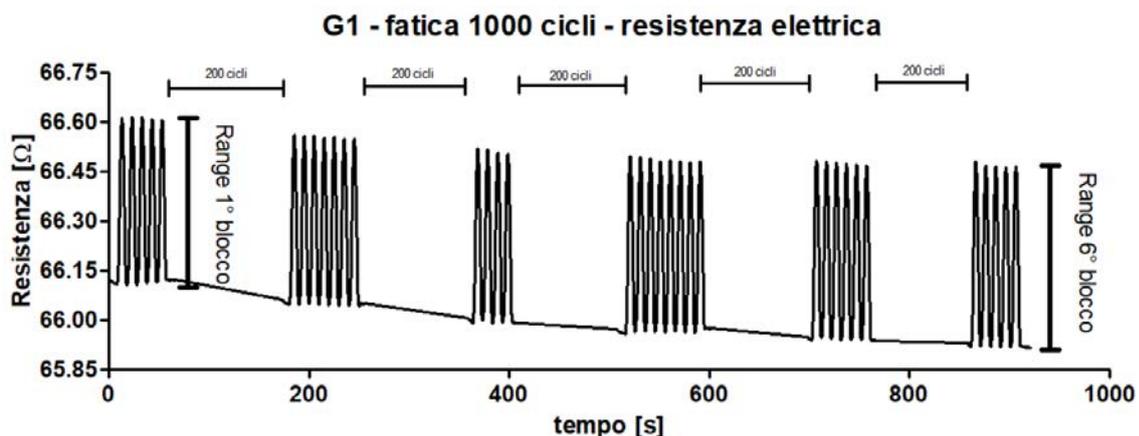


Figura 71 Misura della resistenza elettrica del bundle nella prova di fatica ogni 200 cicli.

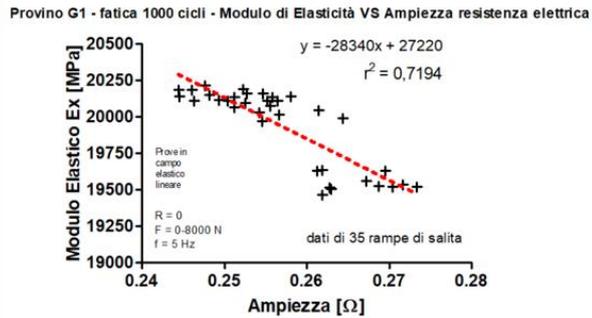
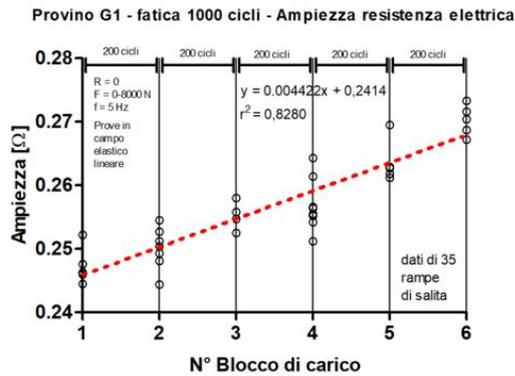


Figura 72 A sinistra: Calcolo della ampiezza della resistenza elettrica per ogni blocco di carico (ogni 200 cicli). A destra correlazione tra il modulo elastico e l'ampiezza della resistenza elettrica.

Si osserva che dopo ogni blocco di carico da 200 cicli l'ampiezza della resistenza elettrica aumenta, sintomo di una deformazione che continua ad aumentare; per mantenere costante il carico da 0 a 8000 N il modulo elastico deve diminuire ed è ciò che accade (Figura 72). A riprova di ciò, si calcolano allo stesso modo le ampiezze della deformazione rilevata dall'estensimetro montato sul provino e si correla con il modulo elastico calcolato per ogni rampa di salita per ogni blocco di carico. Se anche la deformazione segue lo stesso trend della resistenza elettrica significa che il provino si sta danneggiando.

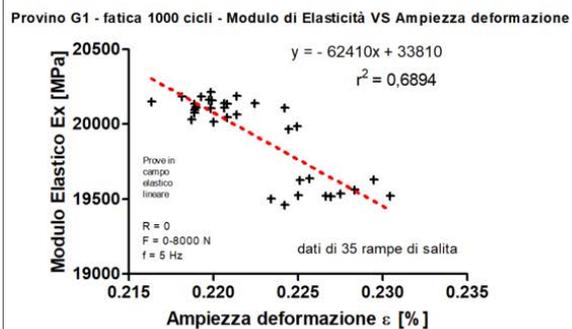
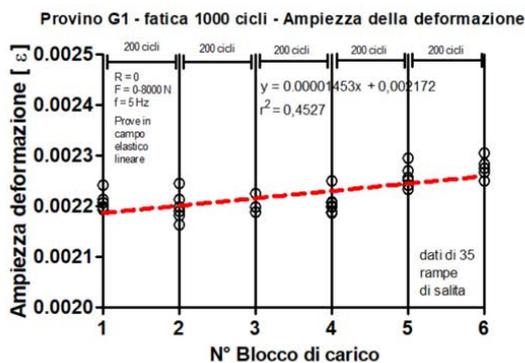


Figura 73 A sinistra: Calcolo della ampiezza della deformazione del provino per ogni blocco di carico (ogni 200 cicli). A destra correlazione tra il modulo elastico e l'ampiezza della deformazione.

Come si vede dai grafici (Figura 73) l'ampiezza della deformazione continua ad aumentare e il modulo elastico diminuisce. Rispetto alla resistenza elettrica i dati di questi due grafici risultano più dispersi (valore r^2 più basso).

Si è calcolato anche il valore del Gauge Factor per il bundle ogni 200 cicli e si nota, dai grafici in Figura 74, che questo valore si modifica mentre i cicli aumentano. Questo comportamento è stato individuato anche nell'articolo [1]. L'aumento del GF può essere un problema nel caso si voglia misurare la deformazione a partire dalla resistenza elettrica del bundle: dalla equazione $\frac{\Delta R}{R_0} = GF \cdot \varepsilon$ si osserva che se si vuole ottenere un valore di deformazione attendibile bisogna conoscere l'andamento del parametro GF durante l'intera vita a fatica del bundle in fibra di carbonio (Figura 74).

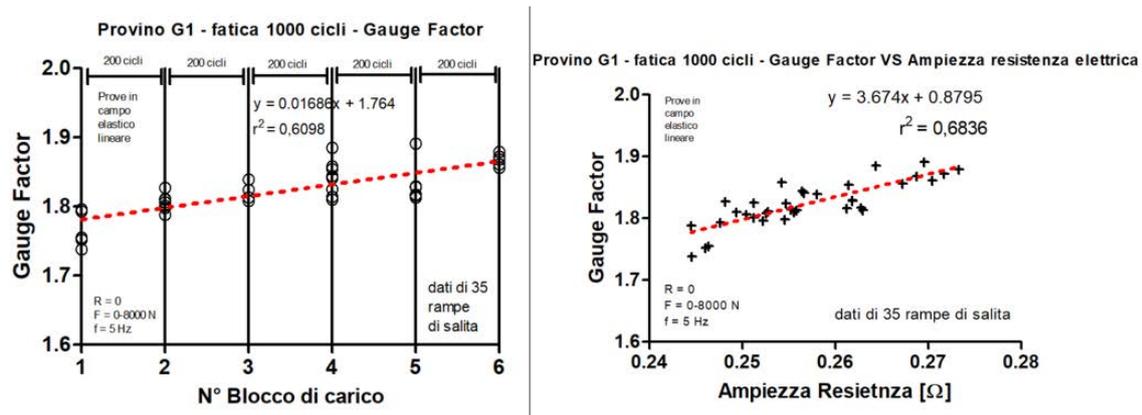


Figura 74 A sinistra: Calcolo del Gauge Factor del provino G1 per ogni blocco di carico (ogni 200 cicli). A destra correlazione tra il Gauge Factor e l'ampiezza della resistenza elettrica.

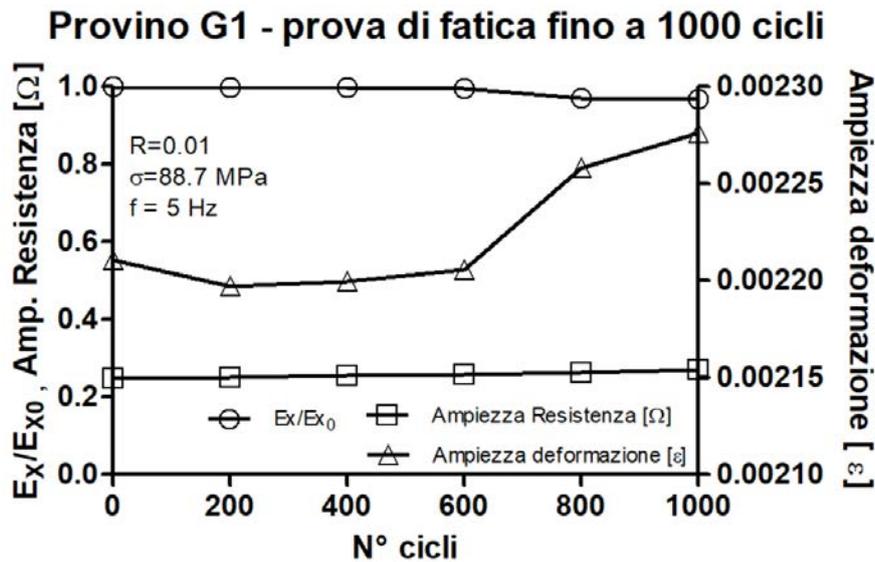


Figura 75 Prova di fatica fino a 1000 cicli sul provino G1. Il grafico riassume la perdita del modulo elastico, l'ampiezza del segnale dell'estensimetro e l'ampiezza del segnale di resistenza elettrica.

Prova di fatica fino a 29000 cicli

Dai risultati della precedente prova di fatica fino a 1000 cicli si è deciso di procedere con una prova di fatica più lunga, ovvero fino a 28000 cicli, sul provino già testato (G1). Il set up della macchina di trazione rimane identico: Il carico applicato è sempre da 80 a 8000 N, $R=0,01$, frequenza 5 Hz per la prova di fatica, mentre 0,1 Hz per le misurazioni elettriche e di deformazione. Considerando solamente le rampe di salita si sono costruiti i seguenti grafici che mostrano l'andamento del modulo elastico, dell'ampiezza deformazione e dell'ampiezza della resistenza elettrica (Figura 76).

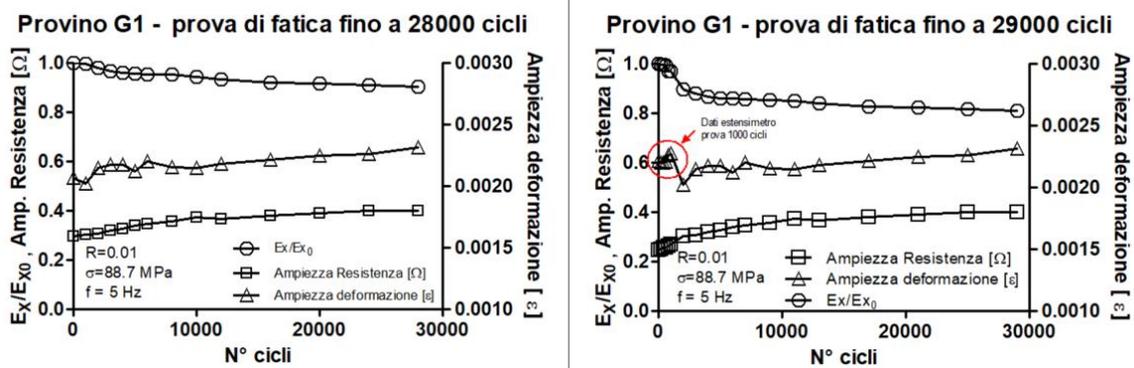


Figura 76 Prova di fatica a 28000 e 29000 cicli. A sinistra grafico della prova a 28000 cicli. A destra il grafico della prova a 29000 cicli in cui sono inseriti i dati della prova fino a 1000 cicli

I dati cerchiati in rosso nel grafico in Figura 76 non sono da considerarsi attendibili perché l'estensimetro della macchina è stato riposizionato e quindi la calibrazione risulta diversa e i valori saranno differenti per la deformazione. Per quanto riguarda i valori di modulo elastico e di resistenza invece si possono considerare attendibili.

Prova di fatica fino a 113000 cicli

Utilizzando il medesimo provino G1 si è continuato il test di fatica per ulteriori 84000 cicli, raggiungendo un totale di 113000 cicli se si sommano i cicli delle prove precedenti.

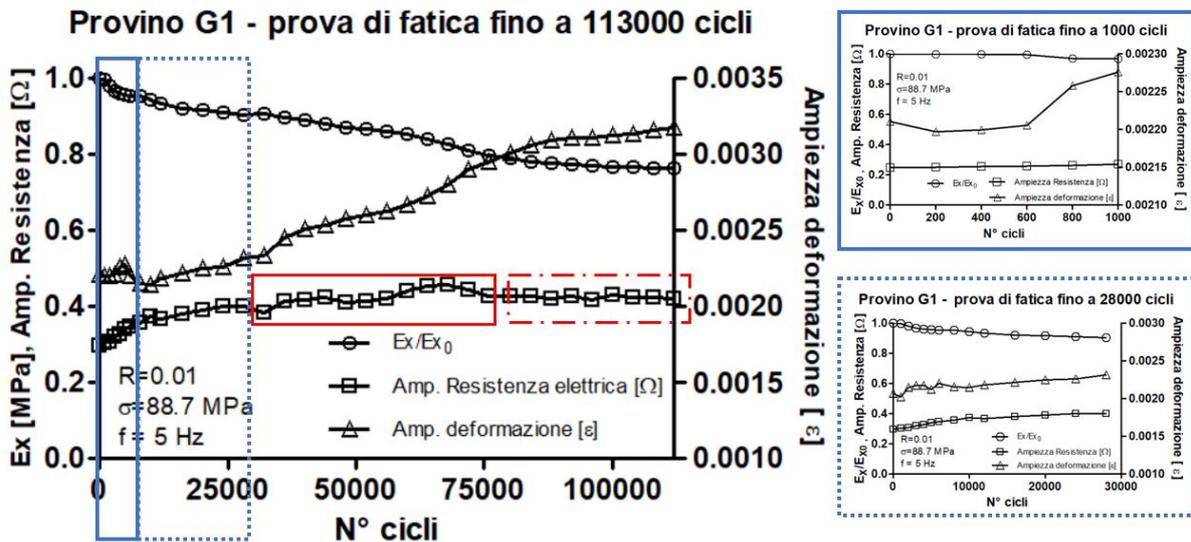


Figura 77 Prova di fatica a 28000 e 29000 cicli. A sinistra grafico della prova a 112000 cicli. Nel grafico sono presenti anche i dati delle due prove precedenti a 1000 e 28000 cicli.

Dalla seguente prova di fatica si possono notare due aspetti del comportamento del bundle e del provino:

1. L'ampiezza della resistenza elettrica presenta una oscillazione (rettangolo rosso non tratteggiato), in seguito la resistenza presenta un plateau (rettangolo rosso tratteggiato), dove non sono visibili incrementi ulteriori anche se il modulo elastico decresce.
2. L'estensometro agganciato al provino misura un progressivo aumento della ampiezza della deformazione, ciò comporta un danneggiamento che è confermato dalla decrescita del modulo elastico.

Il decremento dell'ampiezza della resistenza e il successivo plateau presenta un problema ai fini del monitoraggio strutturale, poiché non può dare informazioni sul progressivo danneggiamento che sta comunque avvenendo nel provino.

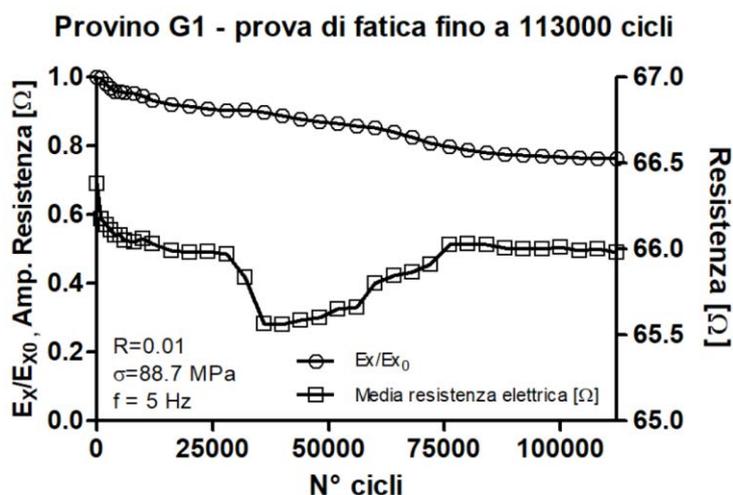


Figura 78 Grafico che mette in relazione la perdita del modulo elastico con la media del segnale di resistenza elettrica dopo ogni blocco di carico.

Per confermare o confutare queste ipotesi si è svolto una secondo test di fatica più lungo (oltre gli 800000 cicli).

Prova di fatica fino a 738000 cicli

È stata condotta una seconda prova di fatica sul provino G2 (Figura 65), ma questa volta con un set-up macchina completamente automatizzato (Figura 79). Tramite una interfaccia grafica autocostruita, in linguaggio di programmazione LabView, è stato possibile realizzare il controllo della acquisizione dei dati. La prova di fatica è stata impostata secondo quanto segue:

- 30 blocchi di carico da 1000 cicli ciascuno;
- 177 blocchi di carico da 4000 cicli ciascuno;

Per un totale di 738000 cicli con rapporto $R=0,01$, frequenza $f=5\text{Hz}$ e tensione applicata al provino di 88,7 MPa. Al termine di ogni blocco di carico da 1000 o 4000 cicli la pressa per trazione ha eseguito una rampa da 0 a 88,7 MPa con frequenza di 0,1 Hz, parallelamente sono stati acquisiti i segnali del Source Meter dell'estensimetro e della cella di carico a bordo della pressa. In aggiunta ai dati è stata anche installata una fotocamera (Baumer -LXG-200M) da 18 MPixel, con l'obiettivo di scattare foto all'intero campione dopo ogni blocco di carico per constatare la presenza e il progredire delle cricche trasversali e della laminazione nel provino.

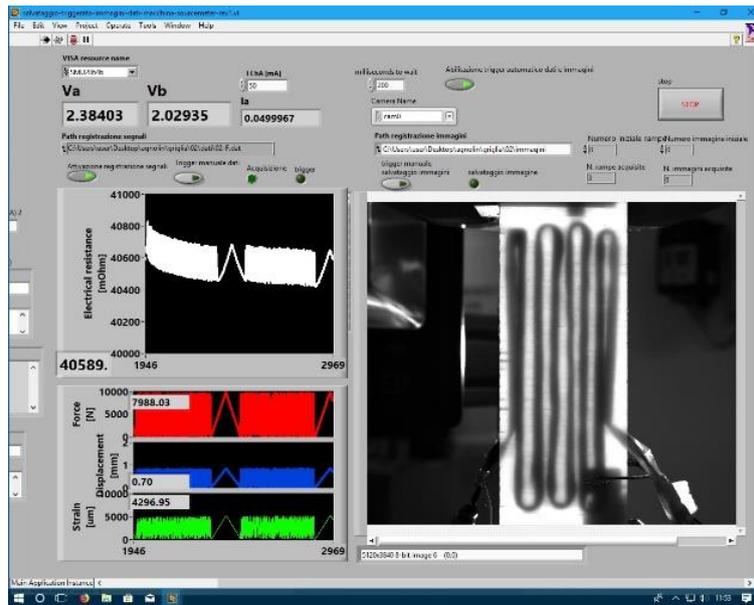


Figura 79 Software realizzato in LabView per il controllo e l'acquisizione dati.

Come per il provino precedente si sono correlati l'ampiezza della resistenza elettrica con la perdita di modulo elastico, ma diversamente dal precedente provino G1 si nota che l'ampiezza della resistenza elettrica non ha un comportamento monotono crescente, invece decresce rapidamente fino a 150000 cicli per poi crescere e infine stabilizzarsi.

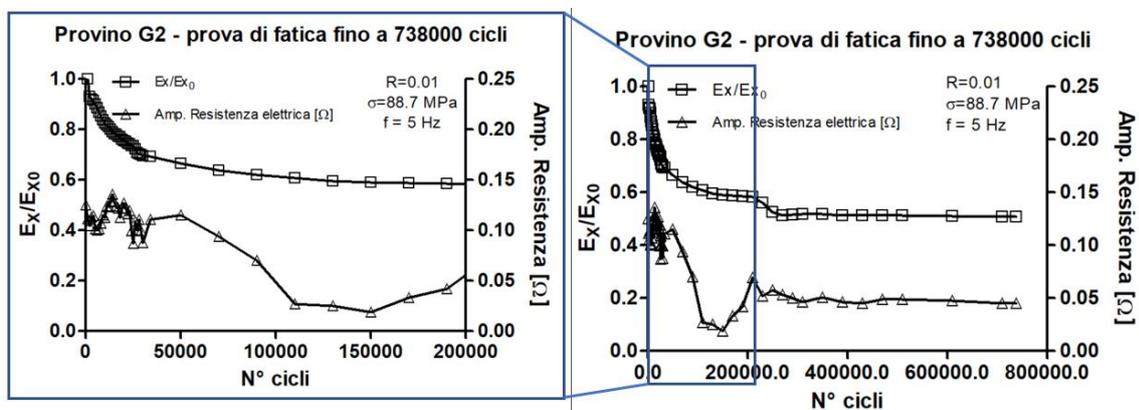


Figura 80 A sinistra: ingrandimento del grafico a destra per poter apprezzare l'andamento della ampiezza della resistenza elettrica nei primi 200000 cicli.

Dalla visione delle immagini catturate dalla telecamera ad ogni blocco di carico si mostra il progredire del danneggiamento del provino G2 (Figura 81). Si nota un progressivo aumento delle cricche trasversali fino a saturazione, dopo di che la delaminazione prende piede.

Provino G2 – prova di fatica 738000 cicli

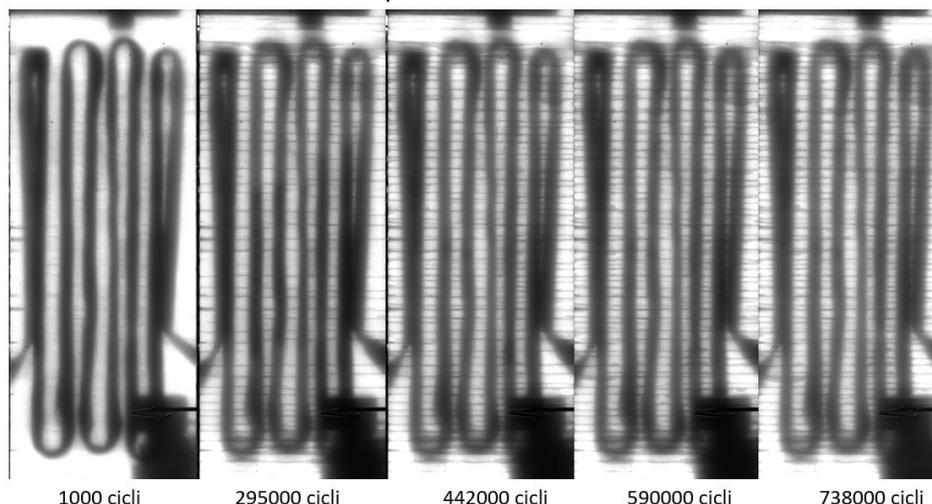


Figura 81 Progressivo danneggiamento del provino G2 a diverso numero di cicli.

In relazione alla delaminazione si è osservato, dalle immagini catturate dalla telecamera, che vi è una progressiva delaminazione del bundle in fibra di carbonio che inizia a circa 30000 cicli e termina attorno ai 150000 cicli (Figura 82); a tutti gli effetti le estremità del bundle, a fine prova, sono staccate dalla superficie del provino. Questo fenomeno di delaminazione potrebbe descrivere la diminuzione della ampiezza della resistenza elettrica proprio tra i 30000 cicli e i 150000 cicli che si era notato nel grafico in Figura 80.

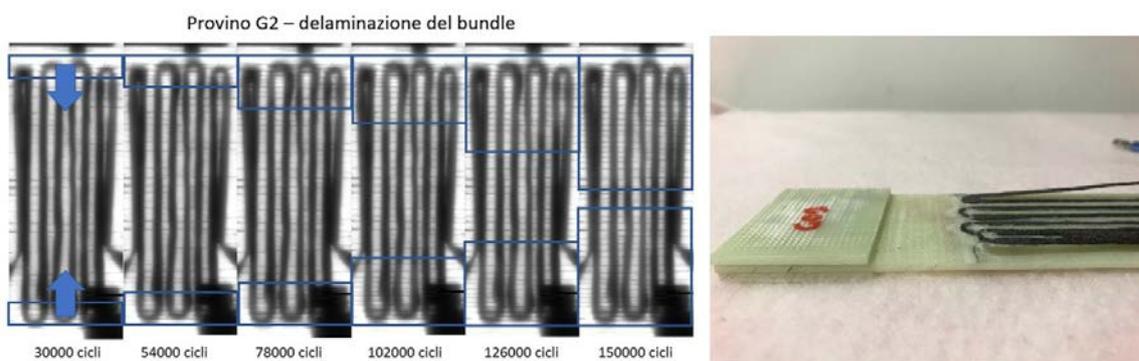


Figura 82 A sinistra: delaminazione del bundle in fibra di carbonio nel provino G2. A destra: bundle staccato dalla superficie del provino G2.

Ingrandendo proprio il grafico in questione si osserva proprio una decrescita della ampiezza di resistenza elettrica dai 50000 ai 150000 cicli. Il motivo di questa decrescita dell'ampiezza potrebbe essere la minore deformazione del bundle dovuto proprio al distacco dalla superficie del provino.

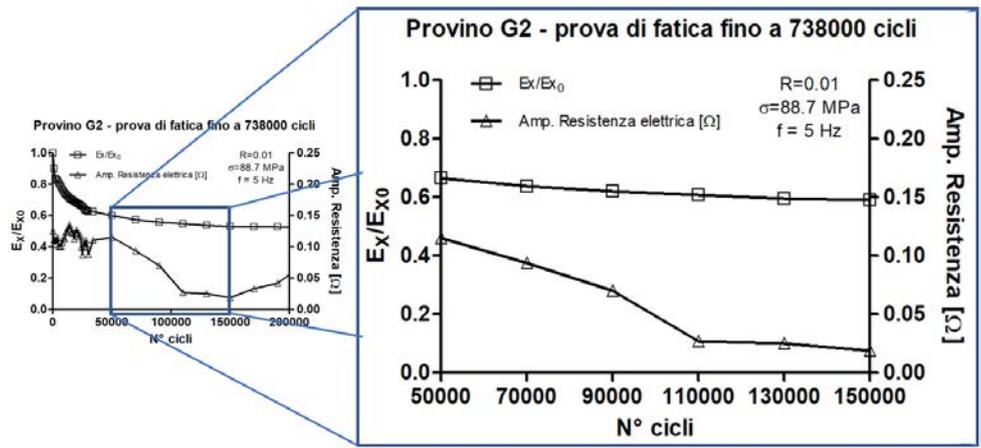


Figura 83 Ingrandimento del grafico in figura 76. Simostra la decrsita dell'ampiezza della resistenza elettrica da 50000 a 150000 cicli.

Un ulteriore comportamento del bundle che è stato osservato è l'inversione della rampa di misura della resistenza elettrica; nei primi blocchi di carico l'aumento della resistenza è coerente con l'aumento della tensione applicata al provino. Successivamente c'è un appianamento della resistenza elettrica che però continua ad aumentare. La terza fase è una inversione della rampa della resistenza elettrica: quando il provino è scarico la resistenza è massima e quando il provino è sottoposto alla massima tensione la resistenza è minima.

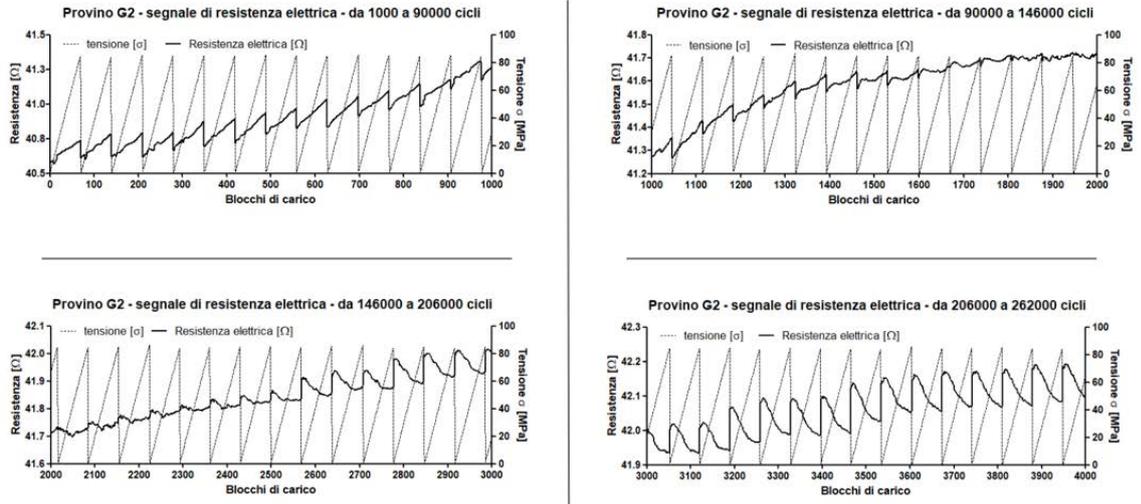


Figura 84 Inversione dell'incremento della resistenza elettrica. Durante i primi 90000 cicli la resistenza aumenta in modo concorde con la rampa di carico, mentre dai 146000 cicli in poi avviene una inversione.

Si è voluto procedere inserendo nel grafico il valor medio della resistenza elettrica, letto dopo ogni blocco di carico, per vedere se il comportamento risultasse il medesimo della ampiezza del segnale della resistenza elettrica.

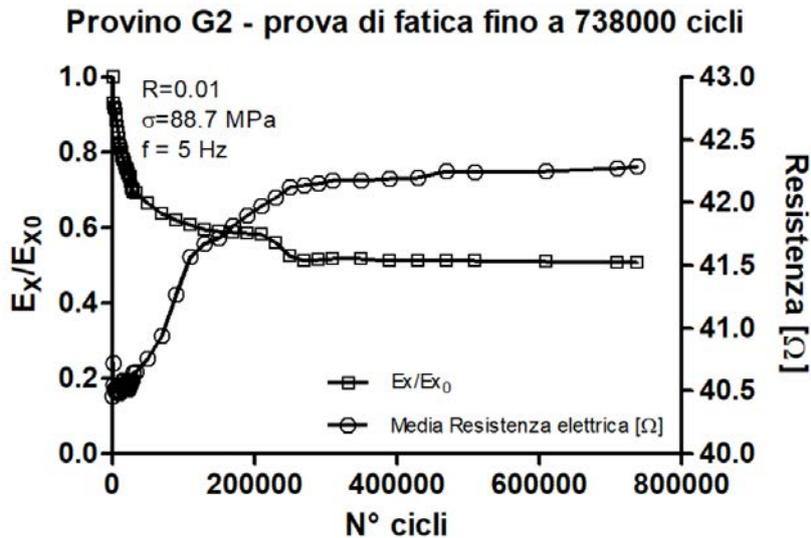


Figura 85 Prova di fatica fino a 738000 cicli per il provino G2.

Il comportamento della resistenza elettrica del bundle è molto più chiaro e correlabile alla perdita del modulo elastico. Focalizzando l'attenzione nei dati fino a 50000 cicli si nota un comportamento affetto da un disturbo, probabilmente dovuto all'effetto di allineamento delle fibre del bundle: le fibre conducono in modo più efficiente la corrente elettrica allineandosi durante i primi 30000 cicli, quindi la resistenza diminuisce¹⁶; una volta terminato questo processo la resistenza elettrica torna a crescere in maniera monotona, finché sia la resistenza elettrica che il modulo elastico raggiungono un plateau.

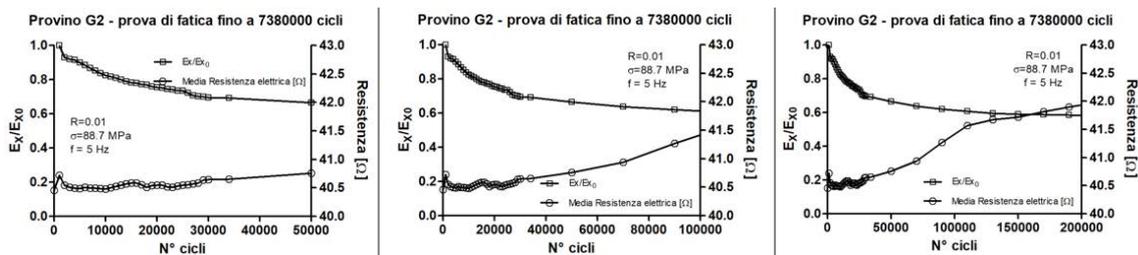


Figura 86 Da sinistra a destra: Prova di fatica sul provino G2, ingrandimento a 50000, 100000 e 200000 cicli

Ciò non toglie che la crescita della resistenza elettrica è direttamente correlabile alla perdita di modulo elastico, e pertanto funge da sistema per il monitoraggio della "salute" del provino, non tanto per l'intera vita del componente, ma per capire quando un componente perde una certa percentuale del proprio modulo elastico.

¹⁶ [16]

Prova di fatica fino a 382000 cicli

In questo paragrafo si descriverà la prova di fatica sul provino G3, il quale è stato sottoposto allo stesso livello di carico del precedente provino G2, inoltre il set-up della macchina e della acquisizione dei dati rimane invariato. Di seguito si mostrano i grafici che correlano il numero di cicli alla perdita di modulo elastico e alla ampiezza della resistenza elettrica (Figura 87) e alla media della resistenza elettrica (Figura 88).

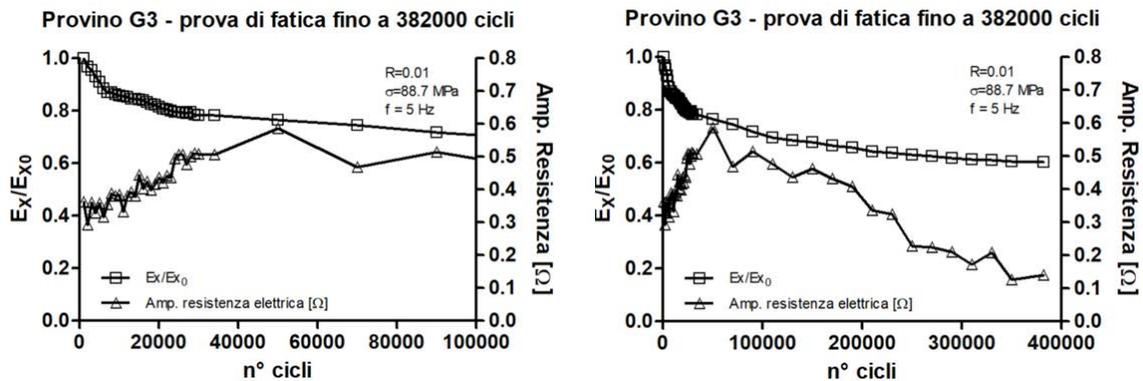


Figura 87 Ampiezza della resistenza elettrica e perdita del modulo elastico in relazione al numero di cicli. A sinistra da 0 a 100000 cicli, a destra da 0 a 382000 cicli.

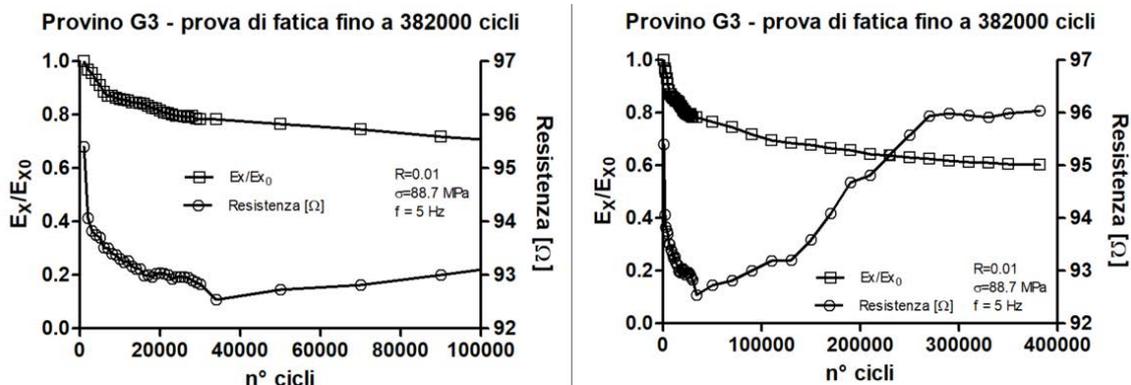


Figura 88 Resistenza elettrica e perdita del modulo elastico in relazione al numero di cicli. A sinistra da 0 a 100000 cicli, a destra da 0 a 382000 cicli.

Il comportamento della ampiezza della resistenza elettrica risulta simile a quello del provino G2, in quanto si ha un iniziale incremento della ampiezza della resistenza elettrica e un successivo decadimento, il quale inizia attorno ai 50000 cicli. La media del segnale di resistenza elettrica invece ha un iniziale decremento dovuto all'allineamento delle fibre di carbonio e al progressivo riallineamento del laminato che è asimmetrico; successivamente a circa 50000 cicli la resistenza torna a crescere superando il suo valore iniziale.

Provino G3 – delaminazione del bundle

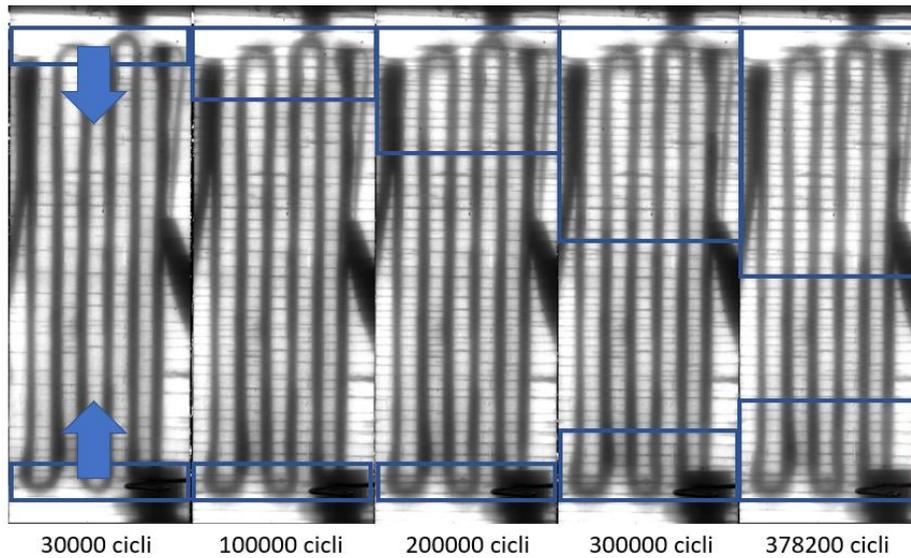


Figura 89 Delaminazione del bundle per il provino G3

Come accadeva per il provino G2, il bundle sulla superficie del provino comincia a delaminare a partire dai 30000 cicli, per poi propagare per tutta la durata della prova. Dalle immagini acquisite al microscopio ottico la delaminazione del bundle non sembra apportare punti di innesco per cricche attraverso lo spessore del laminato in fibra di vetro, pertanto anche se il bundle tende a delaminare esso non provoca un danno al laminato sottostante.

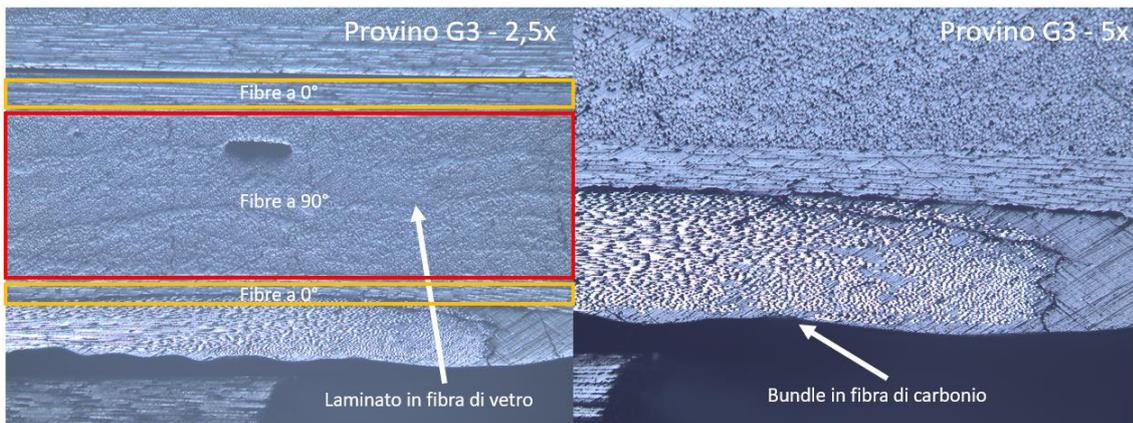


Figura 90 Immagini al microscopio ottico. Delaminazione del bundle in fibra di carbonio dalla superficie del laminato in fibra di vetro

Confronto tra i provini G1, G2 e G3

In questo paragrafo si vogliono confrontare i comportamenti dei 3 provini denominati G1, G2 e G3. Tutti e tre i laminati sono simmetrici $[0/90_2]_s$ per quanto riguarda il lay-up, ma risultano asimmetrici in quanto il bundle in fibra di carbonio è presente solo su di una superficie. Siccome questi laminati sono stati prodotti utilizzando tecniche manuali di deposizione e con bundle di diverso spessore, si vuole mettere a confronto le proprietà meccaniche e le proprietà elettriche (E_x/E_{x0} , Resistenza elettrica, Ampiezza della resistenza elettrica) per confermare che il comportamento globale dei provini sia il medesimo.

Come primo grafico (Figura 91) si vuole mettere in evidenza la differenza di perdita di modulo dei 3 provini. Dopo 100000 cicli la differenza di perdita di modulo tra i provini è la seguente mostrata in Tabella 8.

Tabella 8 Differenza di perdita di modulo elastico tra i provini G1, G2 e G3

Provino	E_x/E_{x0} (a 110000 cicli)	Differenza % tra i provini		
		G1-G2 [%]	G2-G3 [%]	G1-G3 [%]
G1	0,761678631	20,13	-14,20	8,79
G2	0,60834299			
G3	0,69475196			

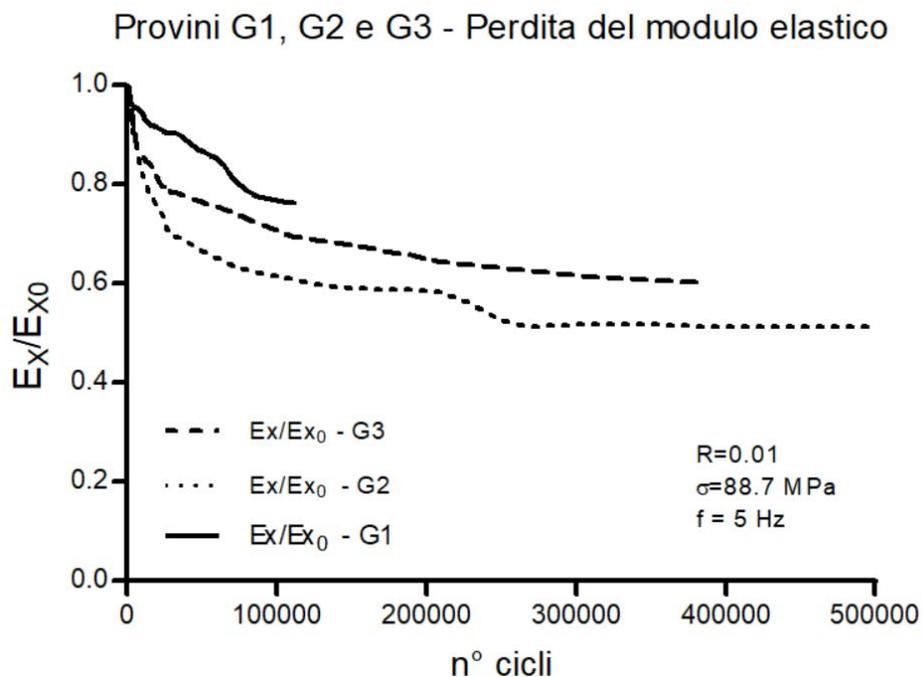


Figura 91 Perdita del modulo elastico all'aumentare del numero di cicli per i 3 provini G1, G2 e G3.

Il secondo grafico che si mostra (Figura 92) riguarda la media normalizzata della resistenza elettrica misurata all'aumentare del numero di cicli per i tre provini G1, G2 e G3; unitamente ai dati appena elencati si è inserito anche la perdita di modulo dei tre provini.

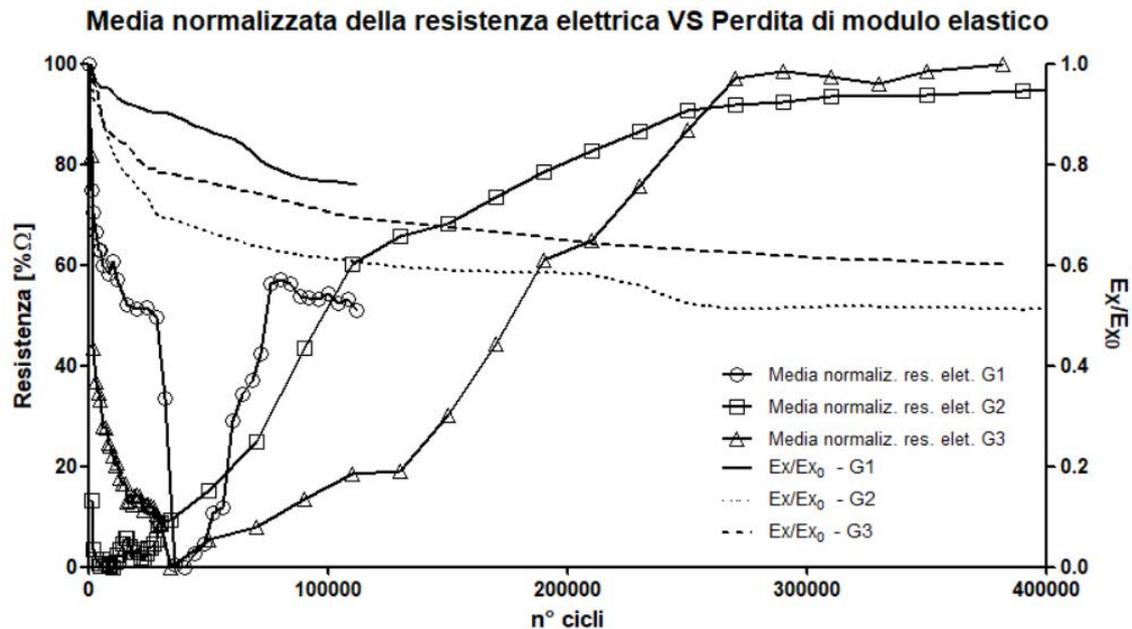


Figura 92 Resistenza elettrica normalizzata e perdita del modulo elastico all'aumentare del numero di cicli per i provini G1, G2 e G3.

Come precedentemente ipotizzato è possibile che la iniziale discesa del valor medio di resistenza elettrica possa essere dovuto all'allineamento delle fibre di carbonio del bundle; si osservano 3 fasi nel grafico di qui sopra:

1. Discesa del valor medio di resistenza elettrica;
2. Aumento del valor medio di resistenza elettrica;
3. Raggiungimento del plateau.

Quest'ultima fase si verifica quando il modulo elastico raggiunge il plateau tipico dei materiali compositi, quando si verifica la saturazione delle cricche trasversali e comincia la delaminazione.

Per quanto riguarda l'ampiezza della resistenza elettrica, se per i primi 1000 cicli si poteva correlare con la perdita del modulo elastico nel provino G1, non è possibile farlo per gli altri provini G2 e G3, ma soprattutto non sono osservabili delle fasi distinte come nel grafico precedente (Figura 92).

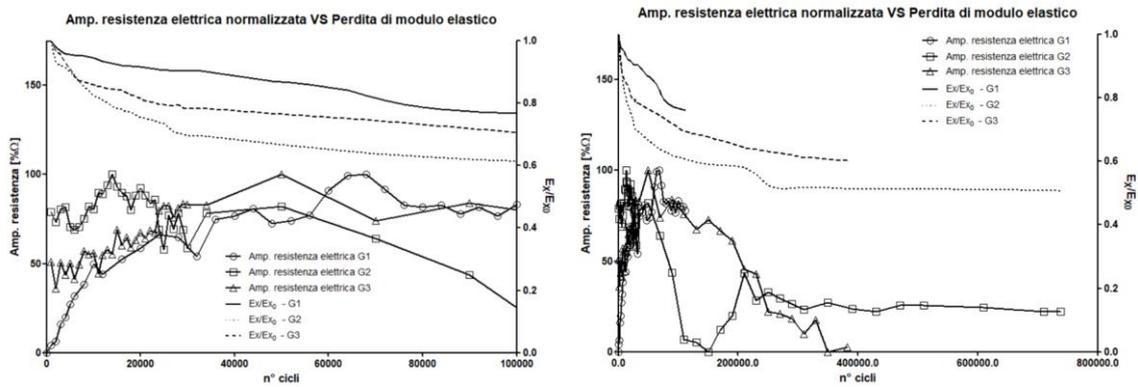


Figura 93 Ampiezza della resistenza elettrica normalizzata e perdita del modulo elastico all'aumentare del numero di cicli per i provini G1, G2 e G3. A sinistra: da 0 a 100000 cicli. A destra: da 0 a 800000 cicli.

È possibile che in fase di allineamento delle fibre si abbia una riduzione della resistenza elettrica che limita quindi l'ampiezza della resistenza elettrica, unitamente alla delaminazione del bundle che inizia dopo i 30000 cicli che comporta un minore allungamento del bundle e quindi nuovamente una minore ampiezza della resistenza elettrica.

Per quanto concerne il Gauge Factor per i 3 provini si può osservare che esso inizia da un valore alto per poi discendere rapidamente. L'andamento della discesa non è esattamente monotono decrescente, in quanto sono presenti delle risalite, ma il trend è sicuramente discendente, come dimostra il valore normalizzato del Gauge Factor al variare del numero di cicli.

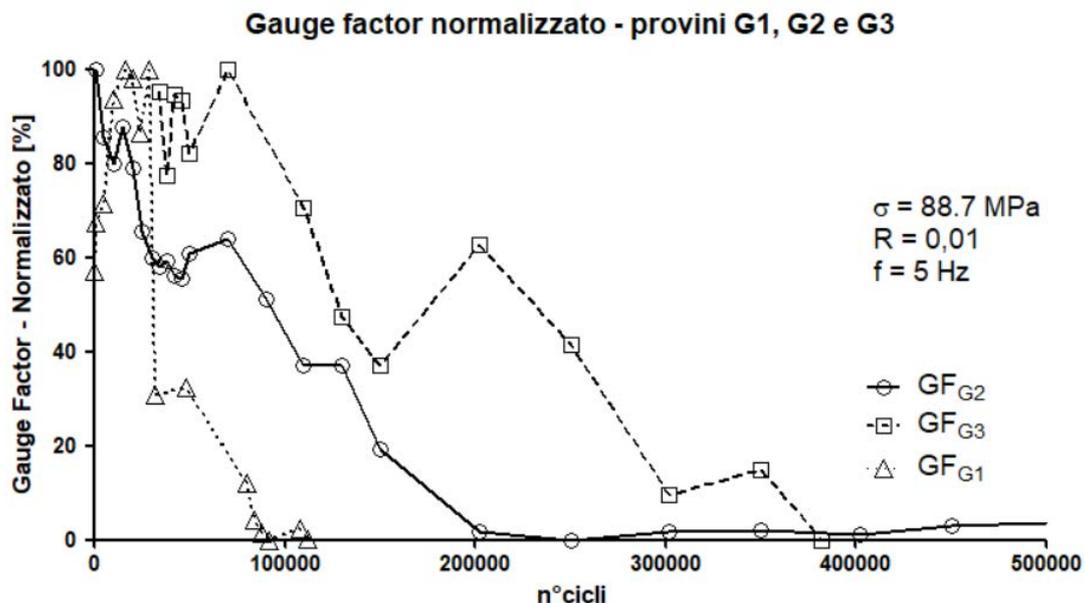


Figura 94 Gauge Factor al variare del numero di cicli della prova a fatica per i provini G1, G2 e G3. Rispettivamente le prove si sono concluse a 112000 cicli per G1 in modo discontinuo, 382000 cicli per G2 e 738000 cicli per G3.

Oltre alle immagini che sono state catturate durante la prova di fatica si sono acquisite anche delle immagini al microscopio ottico del provino G3.

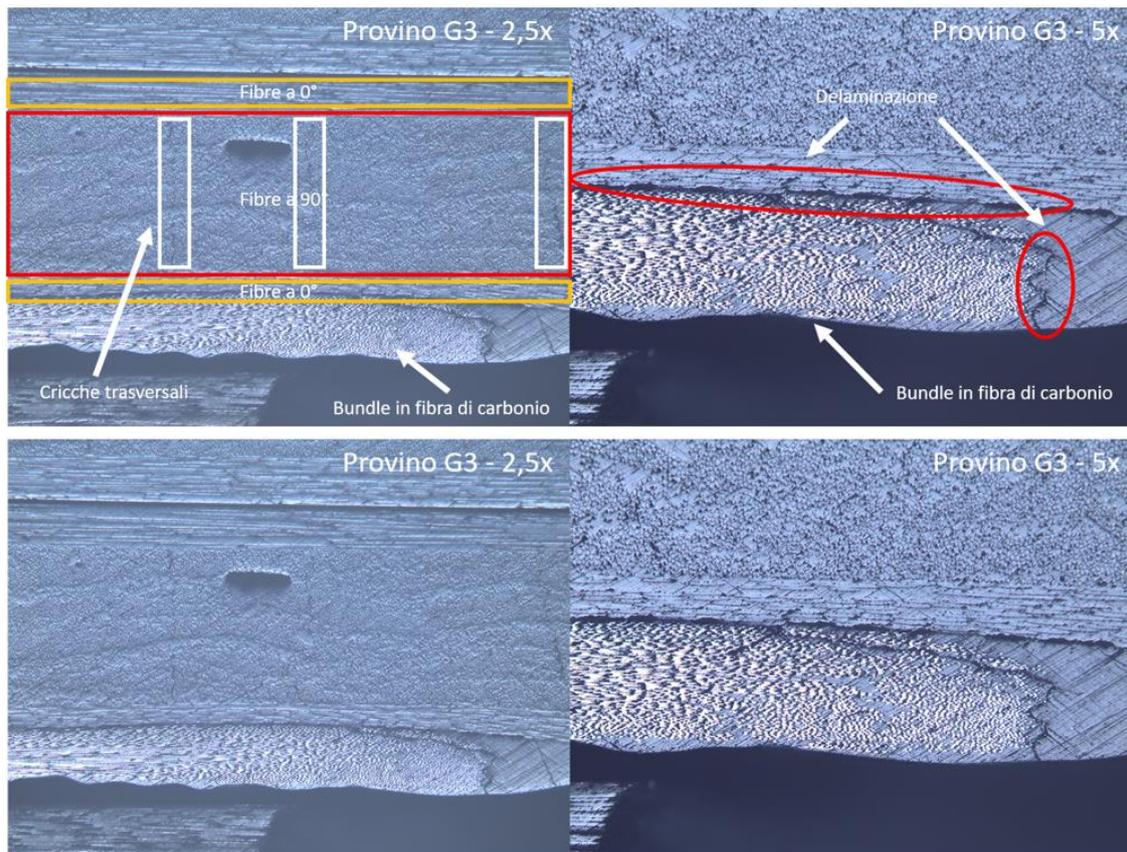


Figura 95 Immagini al microscopio del provino G3. In figura si mostra la delaminazione, dalla superficie del provino, della parte terminale del bundle in fibra di carbonio.

Le immagini mostrano una delaminazione del bundle in fibra di carbonio che si estende tra il primo strato a 0° in fibra di vetro e il bundle stesso. La delaminazione comporta un minore allungamento del bundle durante la fase di trazione e quindi un minore incremento della resistenza elettrica per effetto piezoresistivo.

Correlazione tra E_x/E_{x0} e il rapporto R/R_0

Lo step finale è la correlazione tra la perdita di modulo elastico e il rapporto tra resistenza elettrica misurata e la resistenza elettrica iniziale. Il grafico in Figura 96 mostra la curva di correlazione che risulta affetta da un problema nella parte iniziale ($R/R_0 < 1$); infatti se si misura un incremento della resistenza elettrica minore di 1 allora la curva mostra due risultati, perciò non è univoca. La ragione sta nell'allineamento del laminato asimmetrico che fa ridurre inizialmente la resistenza elettrica; l'altro effetto è dovuto all'allineamento delle fibre di carbonio nel bundle che riducono anch'esse la resistenza elettrica. Il primo problema è certamente risolvibile producendo un laminato simmetrico, il secondo richiede ulteriori indagini poiché dipende dalla disposizione delle fibre di carbonio nel bundle.

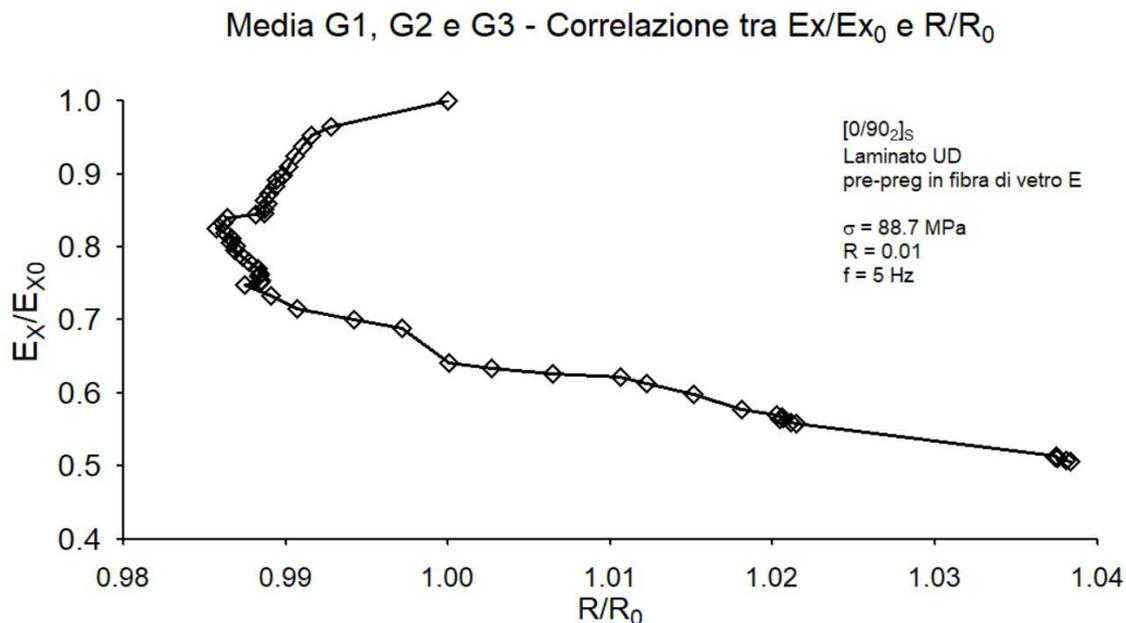


Figura 96 Correlazione tra E_x/E_{x0} e il rapporto R/R_0 , la curva è ottenuta dalla media di 3 provini sottoposti a test di fatica allo stesso livello di tensione e rapporto di ciclo.

In definitiva la curva è utilizzabile per rapporti R/R_0 maggiori di 1 ed è utilizzabile per stimare la perdita di modulo elastico di un materiale non conduttivo. Si tratta di una prima soluzione ad un problema ben più vasto, ma considerato i risultati si può certamente affermare che il lavoro di ricerca svolto può continuare per migliorare le criticità che questo studio ha messo in evidenza.

CAPITOLO 5

Tubo in fibra di vetro $[0,90_2]_s$ con bundle in fibra di carbonio

In questo capitolo si descriverà un tentativo di produzione di un tubo in fibra di vetro di lay-up identico ai laminati testati nei capitoli precedenti. Lo scopo di questa prova è costruire una geometria utilizzata spesso nella produzione di elementi strutturali e introdurre il bundle di carbonio, in modo tale da testare il sistema di SHM indagato precedentemente.

La produzione del tubo è stata pianificata in questo modo:

- tubo in acciaio zincato dal diametro esterno 34 mm utilizzato come stampo;
- sullo stampo è stato avvolto uno strato di peel-ply, sul quale è stato anche steso un film distaccante;
- lay-up manuale degli strati di pre-preg in vetro (UE400REM) con la configurazione $[0,90,90,90,90,0]$;
- posizionamento del bundle in fibra di carbonio avvolgendolo attorno al tubo in modo che formi una spirale;
- deposizione del peel-ply sul laminato appena disposto sul tubo per proteggere le terminazioni del bundle in fibra di carbonio, che saranno utilizzate come punti di ancoraggio per i connettori faston;
- deposizione di un ulteriore strato di peel-ply per evitare la fuoriuscita della resina;
- deposizione di uno strato di feltro per assorbire eventuali fuoriuscite di resina.

Successivamente alle fasi di preparazione del tubo, è stato preparato anche il sacco per il vuoto con le chiusure in butilene per poter effettuare il vuoto. Le fasi appena descritte sono riassunte graficamente nella seguente Figura 97.

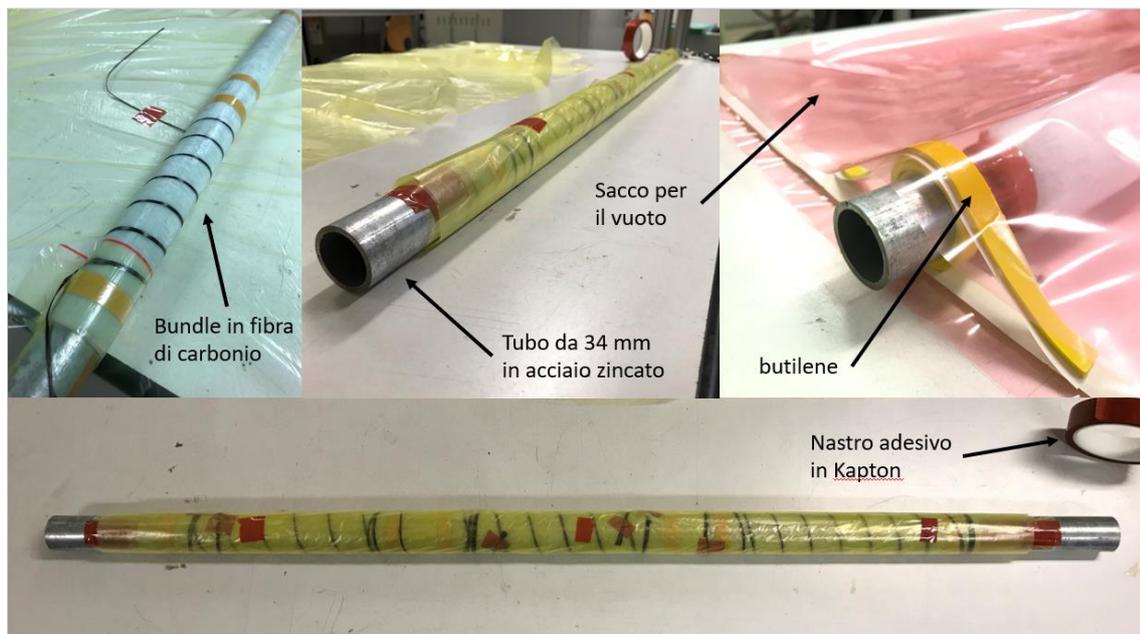


Figura 97 Fasi della preparazione del tubo in fibra di vetro con deposizione del bundle in fibra di carbonio.

Il ciclo di cottura del laminato è lo stesso utilizzato per i laminati precedenti ed è effettuato in autoclave con una temperatura massima di 100°C. Nella seguente figura sono mostrate le fasi di test del vuoto del sacco e inserimento nell'autoclave.



Figura 98 Test del vuoto per il sacco in cui è contenuto il tubo in fibra di vetro e introduzione del tubo nell'autoclave

La fase di *demolding* si è rivelata piuttosto complicata e il tubo in vetro non si è staccato dallo stampo. Per tentare di estrarre il tubo in vetro è stato tagliato nei singoli 3 provini, però anche questo sistema non è stato efficace. Su di un pezzo di tubo è stato eseguito un taglio in direzione longitudinale rispetto all'asse del tubo per indagare se la resina avesse aderito al tubo in acciaio e fosse questo il motivo per cui il *demolding* risultava

difficile. Il provino è stato estratto facilmente dopo il taglio e la resina non aveva aderito allo stampo, perciò è possibile che le tensioni di compressioni dovute ai differenti coefficienti di dilatazione termica siano sufficientemente elevate da rendere impossibile il *demolding*.

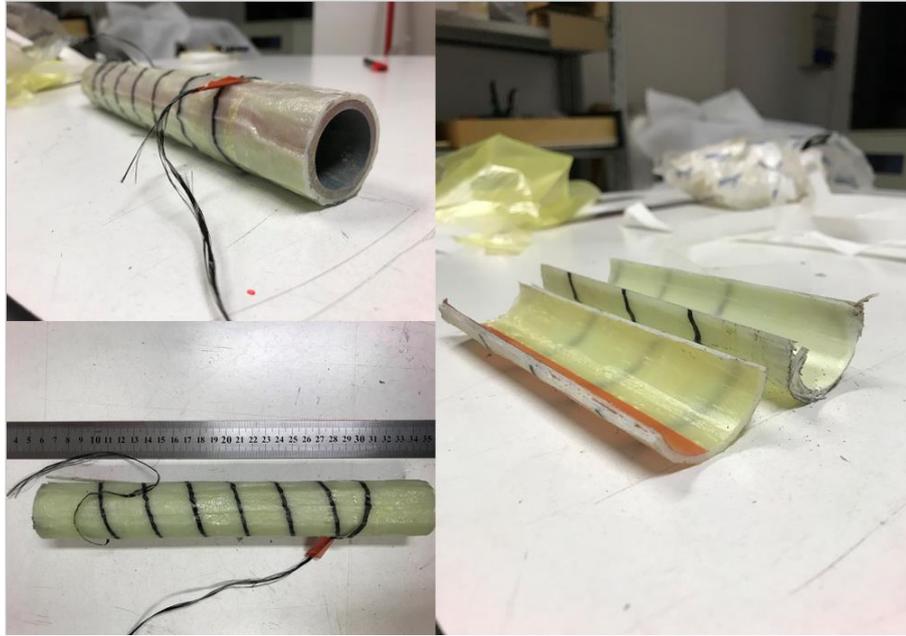


Figura 99 Fase di demolding del tubo in fibra di vetro.

Tralasciate queste difficoltà, il tubo in fibra di vetro non risulta liscio in superficie poiché il peel-ply e il feltro durante la fase di sottovuoto formavano grinze che erano impossibili da evitare per il modo in cui erano stati avvolti sul tubo; pertanto, per un'ulteriore prova, è necessario riprogettare le fasi di *demolding* e di avvolgimento del peel-ply attorno al tubo.

Sebbene non si sia stato possibile produrre autonomamente un tubo in fibra di vetro, è stato dimostrato che la deposizione di un bundle in fibra di carbonio su di una geometria spesso utilizzata nella progettazione di strutture è possibile. È una procedura che può essere facilmente automatizzata poiché esistono già macchine di pull-winding che sono in grado di depositare, con qualsiasi angolo di inclinazione, le fibre di carbonio.

Conclusioni finali

Fin dal principio di questo lavoro di indagine innovativa nel campo della sensoristica per il monitoraggio della integrità strutturale si era fissato l'obiettivo di ricercare molteplici soluzioni da implementare in modalità 1D, ovvero applicabili in fase finale del processo di produzione di un laminato oppure applicabili su laminati già prodotti. Volendo riassumere in modo sintetico le fasi che sono state affrontate in questa indagine, in primo luogo si è iniziato con il raccogliere informazioni sulle esigenze del mercato attraverso i brevetti. Filtrando con parole specifiche come "*SHM*", "*embedded*" e "*composite materials*" è stato possibile creare diagrammi per capire l'interesse che aziende e università di tutto il mondo rivolgono alle tecnologie di monitoraggio dell'integrità strutturale sui materiali compositi con tecnologie 1D.

In secondo luogo, per ricercare gli articoli scientifici che potevano riguardare queste tecnologie si è utilizzato lo stesso filtro di ricerca utilizzato per i brevetti. In questo modo è stato individuato l'interesse scientifico crescente verso le tecnologie *SHM*.

A questo punto è iniziata la raccolta di idee, informazioni, punti deboli e punti di forza di molteplici tecnologie di *SHM 1D* negli articoli scientifici, in modo da ricercare una o più idee da sviluppare praticamente in laboratorio. Quindi, individuata la tecnologia *SHM 1D* piezoresistiva come la più precisa sotto il punto di vista del principio fisico sfruttato, a basso costo in base alla quantità di materiale utilizzato, al processo di deposizione e agli strumenti di acquisizione dati necessari, è stata iniziata l'attività sperimentale di progettazione del sensore.

Il primo laminato è stato testato prima manualmente, poi in pressa per capire l'effettiva sensibilità di misura del bundle in fibra di carbonio. Superati alcuni problemi con il primo laminato a singolo bundle, ne è stato prodotto un secondo con una griglia di fibre di carbonio che, grazie a molteplici prove di fatica, ha portato a misurare il decadimento del modulo elastico di un laminato attraverso l'incremento della resistenza elettrica. Il sensore funge da valido strumento per quantificare il decadimento di rigidità di un componente, dovuto alla presenza di cricche e delaminazioni. È uno strumento a basso costo sia per quanto riguarda il costo del materiale, sia per gli strumenti di misura utilizzati ed è un sistema implementabile alla fine del processo produttivo di un laminato.

I problemi che si sono riscontrati alla fine delle prove sperimentali sono anch'essi molteplici. Il bundle in fibra di carbonio, a causa della diversa rigidità, ha la tendenza a delaminare dallo strato superficiale del laminato comportando una diminuzione della sensibilità (GF); L'allineamento delle fibre del bundle comporta una diminuzione iniziale della resistenza elettrica, che unitamente alla asimmetria del laminato, a causa della presenza del bundle su di un lato solo del provino, porta ad una globale diminuzione della resistenza elettrica nei primi 100000 cicli di fatica, rendendo difficile capire la perdita di modulo elastico globale del laminato. Questi problemi appena elencati sono risolvibili anzitutto creando un laminato simmetrico e utilizzando dei nastri di fibra di carbonio a spessore e larghezza costante, inoltre per limitare la delaminazione è necessario studiare una interfaccia resina matrice adatta a vetro e carbonio.

Concludendo, il sensore è in grado di misurare la diminuzione del modulo elastico di un laminato in fibra di vetro a fibre non conduttive attraverso l'incremento della resistenza elettrica; è una soluzione a basso costo di implementazione, sia per quanto riguarda il processo, sia per i materiali e gli strumenti di misura necessari a rilevare le grandezze elettriche necessarie.

Ulteriore sperimentazione sarà necessaria per verificare se è possibile applicare a componenti strutturali questo metodo di monitoraggio, ma sulle basi di questo studio si osserva un potenziale applicativo notevole.

Bibliografia

- [1] Y. W. P. Z. Y. Z. e. a. G. Wang, «[13] Structure dependent properties of carbon nanomaterials enabled fiber sensors for in situ monitoring of composites,» 13 April 2018.
- [2] F. Gavagnin, «Analisi sperimentale dell'influenza dei parametri di processo sul comportamento a fatica di compositi laminati,» *Tesi*, 2017.
- [3] Y. W. G. W. F. L. S. Luo, «[3] Hybrid spray-coating, laser-scribing and ink-dispensing of graphene sensors/arrays with tunable piezoresistivity for in situ monitoring of,» *ELSEVIER*, p. 8, 9 July 2018.
- [4] B. C. W. B. S.Y. Kim, «[4] Impact paint sensor based on polymer/multidimension carbon nano isotopes composites,» *S.Y Kim, B.G Choi, W.K. Baek, S.H. Park et alt.*, p. 11, 5 February 2019.
- [5] T. L. S. Lou, «[8] SWCTN/Graphite nanoplatelet hybrid thin film for self-temperature compensated, highly sensitive, and extensible piezoresistive sensors,» 13 August 2013.
- [6] M. M. O. Lervolino, «[2] A spirale passive electromagnetic sensor (SPES) for wireless and wired structural health monitoring,» *Meas. Sci. Technol.* 27 045601, p. 12, 2016.
- [7] K. S. R. S. M. Kupke, «[1] Non-destructive testing of FRP by d.c and a.c electrical methods,» *ELSEVIER*, p. 11, 04 July 2000.
- [8] Q. Z. Y. S. C. L. Y. Z. M. Liu, «[7] Research of a novel 3D printed strain gauge type force sensor,» 29 December 2018.
- [9] W. E.-D. A.A nassr, «[9] Non-destructive evaluation of laminated composite plates using dielectrometry sensors,» 6 April 2009.
- [10] S. K. Y. D. D. Kumar, «[10] A wireless shortwave near-field probe for monitoring structural integrity of dielectric composites and polymer,» 2 March 2018.

- [11] A. A. A. M. D. Sen, «[11] Sparsity-based approaches for damage detection in plates,» 6 August 2018.
- [12] C. J. C. Z. N.D. Alexopoulos, «[12] Improved strain sensing performance of glass fiber polymer composites with embedded pre-stretched polyvinyl alcohol–carbon nanotube fibers,» 6 march 2013.
- [13] P. C. M. Quaresimin, «[16] Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension-torsion fatigue loading,» 2014.
- [14] M. F. R. Marat-Mendes, «[17] DCB, ENF and ECT test for interlaminar fracture of glass/epoxy unidirectional laminates,» 2006.
- [15] R. F. G. G. N. F. A. F. Sarchi Fabio, «Wireless structural health monitoring with elongated carbon fiber or matrix sensor». Italia Brevetto WO2004068095A8, 23 Settembre 2004.
- [16] N. N. B. L. C. J. A. H. J. G. P. a. R. L. Songlin Zhang, «[18] Carbon-Nanotube-Based Electrical Conductors: Fabrication, Optimization, and Applications,» Vol. %1 di %2Pag. 12 - Paragr. 5.1, n. 5, 2019.
- [17] M. Z. L. M. S. K. N. A. R. M. Q. Francesco Panozsoa, « [20] Modelling the electrical resistance change in a multidirectional laminate with a delamination,» 2018.
- [18] M. Z. F. P. K. T. L. M. A. S. P. M. Q. Lazaros Tzounisa, «[19] Highly conductive ultra-sensitive SWCNT-coated glass fiber reinforcements for laminate composites structural health monitoring,» 2019.
- [19] F. P. P. C. M. Q. M. Zappalorto, «[21] Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments,» 2017.