

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE
DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

Tesi di Laurea Magistrale

***Monitoraggio strutturale di compositi multifunzionali con
metodi elettrici: analisi numerica e sperimentale***

Relatore

Ch.mo Prof. Zappalorto Michele

Correlatore

Dott. Ing. Maragoni Lucio

Laureando
Zanini Luca

Anno Accademico 2018/2019

“Se tieni duro,
a volte accadono delle cose
che ricostruiscono il tuo coraggio,
la tua fiducia in te stesso”

- Alex Zanardi

Abstract

Nel seguente lavoro di tesi si affronta il tema del monitoraggio dello stato di salute di laminati in composito attraverso misurazioni elettriche. Inizialmente si evidenziano i principali metodi di misura e relativi danni rilevabili con laminati in carbonio, focalizzandosi su alcune risultanze sperimentali.

Successivamente l'analisi si articola in due fasi: nella prima si affronta il problema per mezzo d'implementazioni analitico-numeriche, modellando elementi rappresentativi di volume e laminati simmetrici ad uno o due strati danneggiati, dove si indaga la variazione della resistenza o resistività elettrica in funzione della densità di cricche. Nella seconda fase si realizzano fisicamente dei laminati in materiale composito, costituiti da una matrice di resina epossidica nano-modificata e fibre di carbonio. Quindi, previa caratterizzazione del materiale (morfologica, meccanica ed elettrica), si conclude con delle prove sperimentali, nelle quali si articolano diversi test in funzione del tipo di sollecitazione, metodo di cablaggio e danneggiamento rilevato.

Ringraziamenti

Vorrei esprimere dei sinceri ringraziamenti al Prof. Michele Zappalorto, relatore, all'Ing. Lucio Maragoni, correlatore, al Prof. Paolo Andrea Carraro, al Prof. Marino Quaresimin e all'Ing. Nicola De Rossi, per avermi aiutato nell'analisi e stesura del suddetto lavoro di tesi.

Desidero inoltre ringraziare di cuore la mia famiglia per il sostegno continuo datomi nel corso di questi anni universitari.

A Beatrice, per essermi stata sempre vicina.

Per finire, un abbraccio a tutti gli amici per avermi supportato e sopportato.

INDICE

Capitolo 1

HEALTH MONITORING: STATO DELL'ARTE	1
1.1 INTRODUZIONE	1
1.2 MONITORAGGIO DELLA DEFORMAZIONE	5
1.3 RILEVAZIONE E MONITORAGGIO DEL DANNO	9
1.3.1 DANNEGGIAMENTO NEI MATERIALI COMPOSITI	9
1.3.2 RILEVAZIONE DEL DANNO	10
1.3.3 MONITORAGGIO DEL DANNO	11
1.4 RISULTATI SPERIMENTALI RILEVANTI	13
1.5 REFERENZE	24

Capitolo 2

STIMA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA DI UN LAMINATO NON DANNEGGIATO	27
2.1 INTRODUZIONE	27
2.2 IMPLEMENTAZIONE	28
2.3 RESISTIVITÀ APPARENTE DELLA SINGOLA LAMINA	30
2.4 REFERENZE	31

Capitolo 3

STIMA DELLA RESISTENZA ELETTRICA DI UN LAMINATO DANNEGGIATO	33
3.1 INTRODUZIONE	33
3.2 APPLICAZIONE DEL MODELLO A LAMINATI GFRP [2]	35
3.3 APPLICAZIONE DEL MODELLO A LAMINATI CFRP	36
3.4 REFERENZE	42

Capitolo 4

MODELLO NUMERICO CON RVE	43
4.1 INTRODUZIONE	43
4.2 MODELLAZIONE	43
4.3 RISULTATI	50
4.4 COMMENTI	53
4.5 REFERENZE	54

Capitolo 5	
ANALISI NUMERICA SU PROVINO INTERO CON UNO STRATO CRICCATO	55
5.1 INTRODUZIONE	55
5.2 MODELLAZIONE	55
5.3 RISULTATI	59
5.4 COMMENTI	62
5.5 REFERENZE	64
Capitolo 6	
ANALISI NUMERICA SU PROVINO INTERO CON DUE STRATI CRICCATI	65
6.1 INTRODUZIONE	65
6.2 MODELLAZIONE	65
6.3 RISULTATI	69
6.4 COMMENTI	73
6.5 REFERENZE	77
Capitolo 7	
ANALISI CRITICA DEI RISULTATI DI MODELLAZIONE	79
Capitolo 8	
CAMPAGNA SPERIMENTALE	83
8.1 INTRODUZIONE	83
8.2 PREPARAZIONE	83
8.2.1 PREPARAZIONE DEGLI STAMPI	83
8.2.2 PREPARAZIONE DEL MATERIALE	84
8.2.3 ASSEMBLAGGIO	87
8.3 AUTOCLAVE	89
8.4 TRONCATURA E LUCIDATURA	91
8.5 CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA E CHIMICA DEL MATERIALE	93
8.5.1 OSSERVAZIONE AL MICROSCOPIO OTTICO	93
8.5.2 OSSERVAZIONE AL MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE	94
8.6 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL MATERIALE	97
8.7 CARATTERIZZAZIONE ELETTRICA DEL MATERIALE	103
8.8 PREPARAZIONE DEI PROVINI PER HEALTH MONITORING	108
8.9 PREPARAZIONE DELLE TAB	110
8.10 REFERENZE	112

Capitolo 9

HEALTH MONITORING SU PROVINI SIMMETRICI [+60₃/-60₃]_s	113
9.1 INTRODUZIONE	113
9.2 PROVA STATICA A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 10 ELETTRODI	114
9.3 PROVA CICLICA A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 10 ELETTRODI	116
9.4 RAMPE DI CARICO A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI	119
9.5 PROVA CICLICA A FLESSIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. A]	122
9.6 RAMPE DI CARICO A FLESSIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. A]	125
9.7 RAMPE DI CARICO A FLESSIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI CIRCOLARI	130
9.7.1 CONFRONTO TRA LE DUE PROVE A FLESSIONE	134
9.8 RAMPE DI CARICO A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. B]	136
9.9 COMMENTI	138
9.10 REFERENZE	140

Capitolo 10

HEALTH MONITORING SU PROVINI SIMMETRICI CROSS-PLY [0₂/90₄]_s	141
10.1 INTRODUZIONE	141
10.2 PROVA CICLICA A TRAZIONE-COMPRESSIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. B]	141
10.3 RAMPE DI CARICO A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. B]	147
10.4 PROVA CICLICA A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI OPPOSTI [v. B]	149
10.5 RAMPE DI CARICO A TRAZIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI PASSANTI	152
10.6 RAMPE DI CARICO A FLESSIONE CON CABLAGGIO A 4 ELETTRODI PASSANTI	154
10.7 COMMENTI	156
10.8 REFERENZE	158

Capitolo 11

HEALTH MONITORING CON PROVINI TESTATI A FLESSIONE	159
11.1 INTRODUZIONE	159
11.2 CARATTERIZZAZIONE TESSUTO IN FIBRA DI CARBONIO	159
11.3 PREPARAZIONE DEI PROVINI E DEI TEST	163
11.4 RISULTATI PROVINI [+60 ₃ /-60 ₃] _s	164
11.5 RISULTATI PROVINI CON TESSUTO IN FIBRA DI CARBONIO	169
11.6 COMMENTI	174

Capitolo 12

CONCLUSIONI	175
12.1 VALUTAZIONE DEI RISULTATI	175
12.2 CONSIDERAZIONI FINALI	177
12.3 SUGGERIMENTI PER LAVORI FUTURI	179
12.4 REFERENZE	180

HEALTH MONITORING: STATO DELL'ARTE

1.1 Introduzione

L'utilizzo dei materiali compositi ha avuto, in questi ultimi anni, un impulso particolarmente significativo nei settori che abbracciano la produzione di turbine eoliche, nell'industria aeronautica, nell'industria navale e nell'automotive.

Rappresentano una valida alternativa ai materiali da costruzione tradizionali per: [1]

- un'elevata resistenza specifica (σ_{UTS}/ρ);
- un'elevata rigidità specifica (E/ρ);
- i diversi strati di materiale possono essere sovrapposti in maniera tale da ottenere diverse proprietà meccaniche nelle diverse direzioni e in diverse zone dello stesso componente (*tailoring*);
- i componenti in composito possono essere realizzati praticamente in qualsiasi forma e spesso, il numero totale di parti di una struttura complessa, può essere ridotto;
- possono fornire ottima resistenza agli agenti chimici, corrosivi e all'invecchiamento per effetti ambientali.

Tuttavia, trattandosi di materiali ancora relativamente giovani, l'utilizzo degli stessi può gravare nella decisione poiché: [1]

- i costi sono ancora elevati, è necessaria pertanto una progettazione accurata e la scelta della tecnologia più adatta, in termini di capacità produttiva, costi e prestazioni del componente;
- a causa dei diversi meccanismi di danneggiamento e modi di rottura, non sono ancora disponibili criteri di progettazione di validità generale, infatti una notevole attività sperimentale è spesso necessaria per ottenere dati ammissibili di progetto o per validare il progetto di un componente;
- le condizioni di carico in esercizio (fatica, impatto, temperatura, ...) influenzano le proprietà di resistenza;
- la presenza di inserti e giunzioni rende la progettazione più complessa.

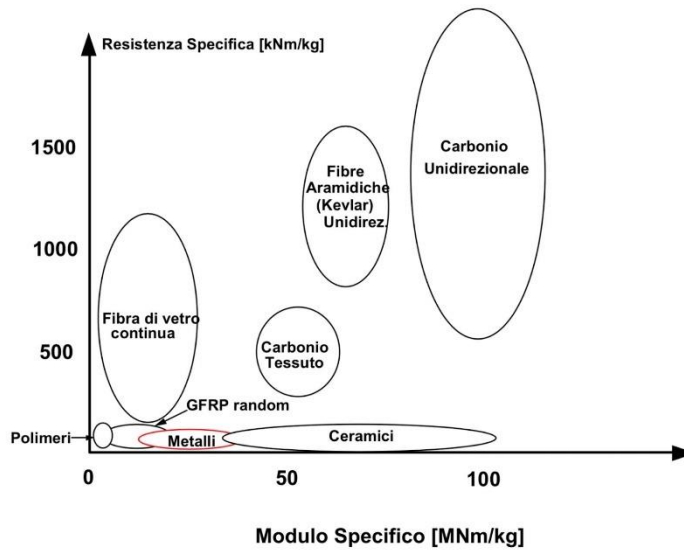


FIG.1.1 Confronto delle proprietà specifiche con materiali d'uso convenzionale [1].

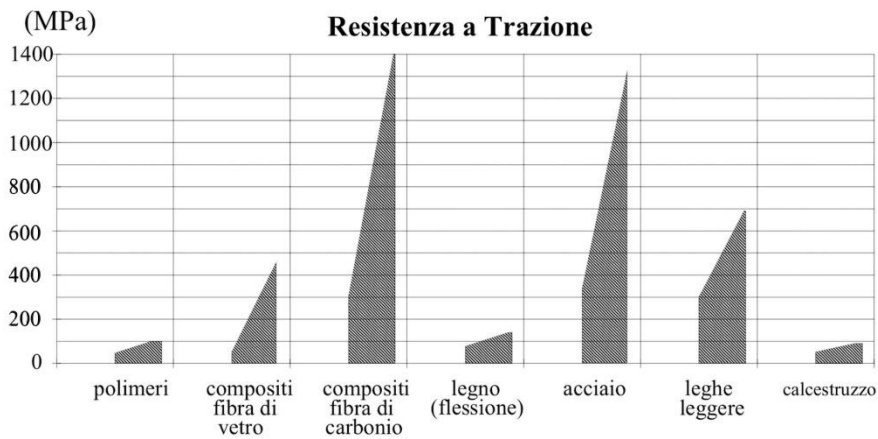


FIG.1.2 Confronto della resistenza a trazione con materiali d'uso convenzionale [1].

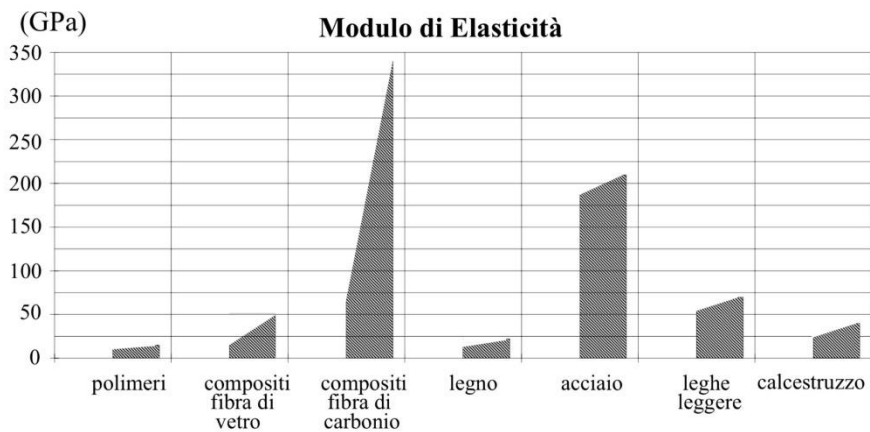


FIG.1.3 Confronto del modulo elastico con materiali d'uso convenzionale [1].

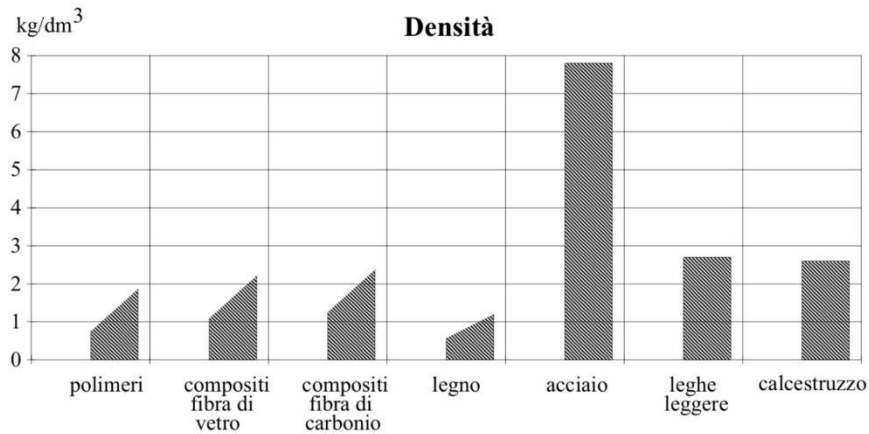


FIG.1.4 Confronto della densità con materiali d'uso convenzionale [1].

Nello specifico, oggetto di discussione della presente tesi saranno i compositi polimerici fibro-rinforzati (*FRPs – Fiber reinforced polymers*). I *FRP* costituiscono una vasta gamma di materiali compositi, costituiti da una matrice polimerica di natura organica con la quale viene impregnato un rinforzo in fibra continua dalle elevate proprietà meccaniche.

[2] Si tratta di materiali eccezionali per applicazioni d'avanguardia, caratterizzati soprattutto da un'eccellente leggerezza e da eccellenti proprietà meccaniche. Le prestazioni, tuttavia, sono fortemente influenzate da possibili danneggiamenti interni del materiale che si presentano durante la vita d'esercizio. Nello sviluppo della produzione di compositi, bisogna considerare che la maggior parte delle parti strutturali realizzate con *FRP* sono progettate con lo scopo di garantire una resistenza a carichi molto elevati che possono indurre un danneggiamento progressivo nel materiale, come: rottura della matrice, delaminazioni e rottura delle fibre. Diretta conseguenza sarà, pertanto, la degradazione delle proprietà meccaniche durante il ciclo vita del materiale stesso.

Per di più, a differenza dei materiali da costruzione tradizionali quali i metalli, con i materiali compositi vi è una propensione sempre maggiore nel progettare tenendo conto della perdita di rigidità piuttosto che una perdita di resistenza (*Design for Strength vs Design for Stiffness*). A fronte di quanto detto, risulta sempre più incombente la necessità di eseguire delle manutenzioni periodiche, al fine di garantire lo stato di salute del componente, senza che queste però compromettano la salute stessa. Tutt'oggi infatti ispezioni basate su test non distruttivi (*NDT-Non Destructive Testing*) sono generalmente utilizzate per la maggior parte delle strutture tecnologicamente complesse. Il problema fondamentale però risiede nella mancanza di informazioni relative ad eventuali danneggiamenti che si verificano tra due manutenzioni successive.

Si ha infatti una fotografia relativa allo stato di salute del materiale solamente nel momento in cui si esegue manutenzione. Se si volesse monitorare l'intero ciclo vita del componente utilizzando approcci di ispezione classici, si dovrebbero eseguire dei controlli ad intervalli di tempo altamente ravvicinati, gravando ulteriormente sul costo vita del componente stesso.

[3] Al fine di superare tali carenze, l'idea è quella di utilizzare "materiali sensibili", ossia materiali che, associati ad opportuni sensori, siano in grado di fornire informazioni in tempo reale riguardo lo stato di salute proprio. Si tratta dunque di utilizzare sensori specifici integrati nella struttura stessa del materiale per un monitoraggio strutturale in tempo reale (*Health Monitoring* – Monitoraggio della Salute). I sensori tuttavia devono rispettare tre requisiti fondamentali, devono essere di dimensioni ridotte, devono offrire la possibilità di essere posizionati in remoto e devono essere in grado di trasmettere informazioni ad un processore centrale.

La condizione preliminare però è che il materiale sia "sensibile", il modo più naturale per garantire tale sensibilità è utilizzare il materiale stesso, o parte di esso combinato con il resto del sistema, come sensore. Questo è possibile in particolar modo con compositi fibro-rinforzati per mezzo di fibre di carbonio (*CFRPs – Carbon Fiber reinforced polymers*) poiché le fibre stesse, da un punto di vista elettrico, sono equiparabili a dei conduttori elettrici, e nel momento in cui all'interno della struttura del componente si manifestano rotture delle fibre o del network che le collega, la conducibilità elettrica del materiale stesso dovrebbe subire una variazione. Una variazione in termini di conducibilità elettrica tuttavia, può essere registrata anche a seguito dell'applicazione di una deformazione.

In letteratura a tal proposito, sussistono infatti, due macro-categorie nell'ambito dell'*Health Monitoring*:

1. *Strain Monitoring*: monitoraggio della variazione della resistenza elettrica del componente a seguito di una deformazione applicata, a denotare un comportamento piezoresistivo del materiale stesso;
2. *Damage Detection and Monitorig*: rilevamento e monitoraggio della variazione della resistenza elettrica del componente a seguito di un danneggiamento interno come, rottura delle fibre, *debonding* fibra -matrice, rottura della matrice (cricche) e delaminazioni. Si denota in tal caso un comportamento del materiale auto-sensibile.

1.2 Monitoraggio della deformazione

[4] La maggior parte dei sensori che sfruttano un comportamento piezoresistivo per effettuare delle misure in termini di deformazione localizzata, prendono il nome di estensimetri (*Strain Gage*). Il comportamento piezoresistivo del materiale può essere brevemente descritto a partire dal considerare la resistenza elettrica di un filo conduttore:

$$R = \eta \frac{L}{A} \quad (1.1)$$

dove η è la resistenza elettrica specifica del materiale conduttore, ossia la sua resistività, L la lunghezza del filo ed A l'area della sezione trasversale.

A deformazione applicata, la resistenza elettrica del materiale subisce una variazione, funzione delle variazioni di resistività, lunghezza e sezione trasversale del filo conduttore.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} = (1 + 2\nu)\varepsilon_l + \frac{\Delta \eta}{\eta} \quad (1.2a)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L} \quad \nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (1.2b/c)$$

La variazione di resistività è proporzionale alla variazione di volume secondo una costante propria del materiale m .

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = m \frac{\Delta V}{V} \quad (1.3)$$

Infine, per mezzo di semplici passaggi algebrici è possibile esprimere la variazione di resistenza elettrica in funzione della deformazione che il materiale stesso subisce:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1.4)$$

$$K = (1 + 2\nu) + m(1 - 2\nu) \quad (1.5)$$

K è una costante di proporzionalità definita in letteratura come “*Gage Factor*”.

Se si assimila il comportamento delle fibre di carbonio alla pari del comportamento di un estensimetro, il *gage factor*, nel verso delle fibre durante una fase di carico di trazione, lungo la direzione delle fibre stesse, dovrebbe essere prossimo a 2.

Mentre lungo la direzione trasversale non è univocamente determinabile a causa del contatto tra fibre parallele, che comporta una forte influenza nei confronti della conducibilità elettrica.

Per valutare l'effetto piezoresistivo sopra descritto, occorre cablare opportunamente il provino al fine di eseguire le corrispettive misure elettriche, volte a stimare delle variazioni, in termini di potenziale elettrico o resistenza elettrica.

In letteratura, i metodi maggiormente utilizzati a tale scopo prevedono l'utilizzo di:

- o 2 sonde/elettrodi (*two-probe method*) posizionati alle estremità del provino, tramite cui si inietta corrente e si monitora, attraverso i medesimi, le rispettive variazioni di potenziale elettrico o resistenza elettrica;
- o 4 sonde/elettrodi (*four-probe method*) posizionati ad anello nella zona compresa tra le 2 *tab*. Tipicamente l'iniezione della corrente avviene per mezzo della coppia di elettrodi più esterni (A_1 e A_2), mentre le misure relative alle variazioni di potenziale elettrico o resistenza elettrica avvengono tramite la coppia di elettrodi più interni (B_1 e B_2).

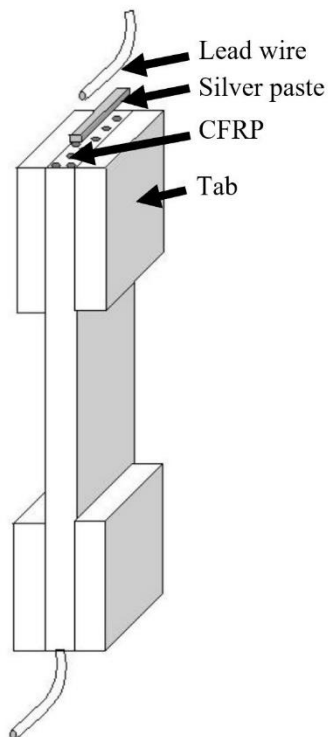


FIG.1.5 Metodo a 2 Elettrodi [4].

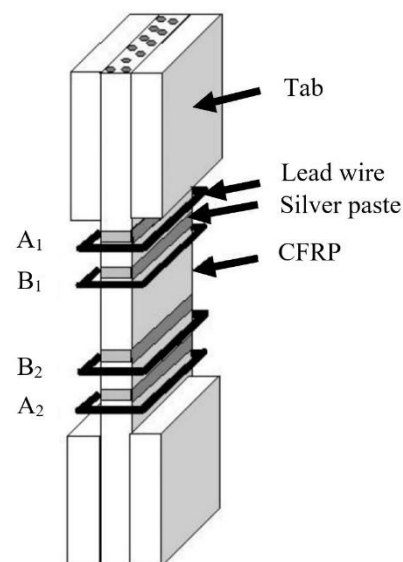


FIG.1.6 Metodo a 4 Elettrodi [4].

Per valutare se convenga l'utilizzo del metodo a 2 Elettrodi anziché a 4 Elettrodi o viceversa, si distinguono in prima analisi i risultati, presenti in letteratura, tra prove statiche e prove cicliche. I materiali analizzati sono sempre compositi fibro-rinforzati con fibre di carbonio distribuite lungo la direzione di applicazione del carico (unidirezionali).

1. Prove Statiche di Trazione

Metodo a 2 Elettrodi

- Schulte et al. [5] riportano un valore di k positivo; registrano pertanto un incremento della resistenza elettrica nella direzione delle fibre a seguito di un incremento della tensione applicata nella direzione delle fibre stesse.

Metodo a 4 Elettrodi

- Di contro Wang et al. [6], a seguito di un incremento di tensione lungo la direzione delle fibre, monitorano un decremento della resistenza elettrica, riportando perciò un valore di k negativo.
- Infine, però, Angelidis et al [7] analizzano i risultati ottenuti, a seguito di prove statiche di trazione, in funzione del trattamento che subiscono le superfici sulle quali andranno poi posizionati gli elettrodi.

Se queste vengono trattate con vernice argentata si ottiene un valore di k positivo mentre, se la vernice è a base carbonio, k assume un valore negativo.

2. Prove Cicliche di Trazione

Metodo a 4 Elettrodi

- Todoroki et al. [8] esaminano nel dettaglio l'effetto della resistenza di contatto in corrispondenza degli elettrodi.
 - Se il laminato è costituito da una sola lamina (*Single-Ply*) il valore di k è sempre positivo.
 - Mentre se il laminato è costituito da più lamine (*Multi-Ply*) il valore di k dipende dal trattamento superficiale che subisce il provino in corrispondenza del posizionamento degli elettrodi. Infatti, a parità di vernice argentata, se la superficie viene lucidata si ottiene un valore di k positivo, di contro se la superficie grezza viene solamente verniciata, k assume un valore negativo.

- Infine, Todoroki et al. [9] ricordano l'assoluta importanza relativa alla condizione degli elettrodi e soprattutto al contatto elettrico tra elettrodi e superfici del provino. Qualora questi siano danneggiati o mal posizionati, la conducibilità elettrica nei *CFRP*, essendo una proprietà ortotropica, gioca un ruolo di rilievo nella distorsione del campo del potenziale elettrico, contribuendo ad ottenere un valore di k negativo.

Quindi per concludere, se a parità di prova e condizioni si ottengono un *gage factor* negativo, cablando il provino con 2 elettrodi e un *gage factor* positivo, cablando con 4 elettrodi, tale situazione può essere spiegata interpretando:

1. l'incremento di resistenza elettrica ($k > 0$) come un aumento della resistenza di contatto in corrispondenza degli elettrodi;
2. il decremento di resistenza elettrica ($k < 0$) all'aumentare del carico applicato, come un corretto riallineamento delle fibre, con conseguente aumento della conducibilità elettrica complessiva lungo la direzione delle fibre stesse.

Altrimenti, se gli elettrodi sono integri, posizionati previa lucidatura e successiva applicazione di vernice argentata e se le fibre sono perfettamente allineate, a deformazione avvenuta, la resistenza elettrica complessiva, lungo la direzione delle fibre, deve necessariamente aumentare, garantendo un valore di k positivo (*Positive Gage Factor*).

1.3 Rilevazione e monitoraggio del danno

1.3.1 Danneggiamento nei materiali compositi

In prima analisi si accennano i principali metodi di danneggiamento e cedimento relativo a materiali compositi fibro-rinforzati. [10] L'anisotropia del laminato, può indurre nel materiale uno stato di tensione multiassiale anche in presenza di una sollecitazione esterna monoassiale. Inoltre, per effetto della non omogeneità microstrutturale, le modalità e i meccanismi di cedimento sono molteplici.

Infatti, a seconda delle modalità di applicazione del carico e soprattutto l'orientazione del laminato, si può giungere a cedimento o delle fibre o della matrice, a seconda che il materiale in esame sia *fiber dominated* o *matrix dominated*.

Per fare alcuni esempi si distinguono due macrocategorie.

1. Carichi esterni applicati di trazione.

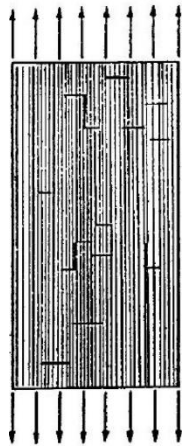


FIG.1.7 Cedimento a trazione delle fibre [10].

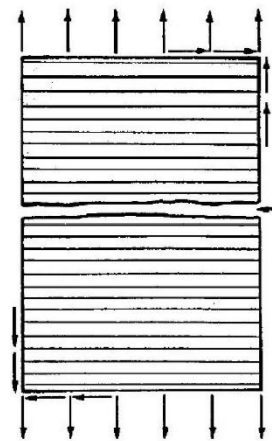
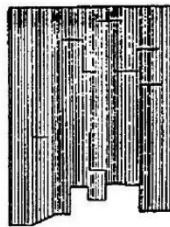


FIG.1.8 Cedimento a trazione della matrice [10].

Come visibile in Figura 1.7, se si sollecita il materiale lungo la direzione di orientazione delle fibre, si ha cedimento nel momento in cui si portano a rottura tutte le fibre, giungendo ad un fronte di splitting longitudinale. Questo fronte non è univocamente determinato poiché, nella realtà, le fibre non sono sempre perfettamente cilindriche, ma hanno delle variazioni geometriche che dipendono dalle modalità di fabbricazione delle stesse. Omettendo condizioni ideali, si ha quindi una distribuzione probabilistica di cedimento che interessa anche la fibra stessa. In questo caso il comportamento del materiale è dominato dalle fibre (*fiber dominated*).

Invece, se si sollecita il materiale lungo la direzione perpendicolare rispetto all'orientazione delle fibre, come visibile in Figura 1.8, si ha cedimento quando si porta a rottura la matrice, si parla in questo caso di rottura catastrofica e il comportamento del materiale è dominato pertanto dalla matrice (*matrix dominated*).

2. Carichi esterni applicati di compressione.

A compressione invece, se si sollecita lungo la direzione di orientazione delle fibre, l'evoluzione del danno è più complessa. Nel momento in cui il laminato, o parte di esso, giunge in instabilità, si ha un cedimento a taglio della matrice e formazione di *kink-band*, con rispettiva rottura delle fibre. Si riporta una rappresentazione semplificata in Figura 1.9.

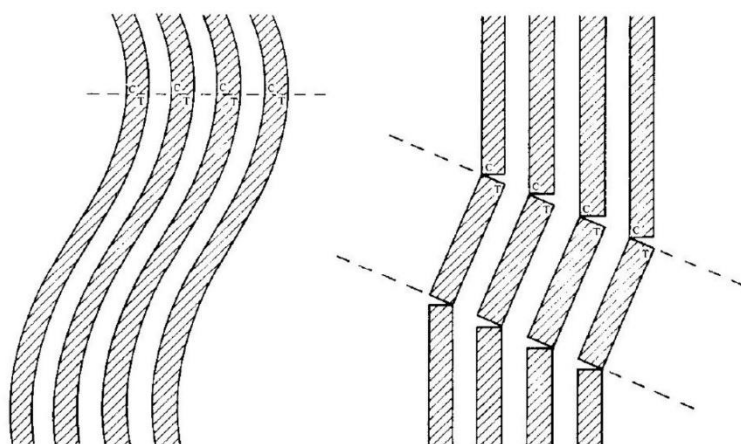


FIG.1.9 Cedimento a compressione delle fibre e corrispettive sollecitazioni interne di trazione e compressione [10].

1.3.2 Rilevazione del danno

[4] Vi sono diverse pubblicazioni relative al rilevamento e stima del danneggiamento di materiali compositi, fibro-rinforzati con fibre di carbonio, per mezzo di misure sulla variazione della resistenza elettrica. Si distinguono tre campi di danneggiamento.

1. Carichi monotoni e ciclici.

Carichi monotoni, con rottura del provino, tipicamente si utilizzano per caratterizzare la variazione di resistenza elettrica, in termini di *gage factor* e sensibilità del materiale. Infatti, non scaricando mai il componente, è difficile valutarne la quota di incremento di resistenza elettrica relativa ad un effetto piezoresistivo e la restante parte relativa al danneggiamento.

Mentre per mezzo di carichi ciclici, attraverso un incremento della resistenza elettrica:

- Schulte et al. [5] rilevano la rottura delle fibre, su provini unidirezionali in fibra di carbonio, secondo metodo a due elettrodi posizionati sulle estremità del campione;
- Abry et al. [11] rilevano *debonding* tra fibra e matrice e cricche nella matrice, su provini *cross-ply* in fibra di carbonio, secondo metodo a due elettrodi posizionati sulle estremità del campione e due centrali;
- Omagari et al. [15] rilevano un valore di *crack density* progressivamente maggiore, su provini *cross-ply* in fibra di carbonio, secondo metodo a quattro elettrodi, posizionati su una superficie del campione. Analizzano inoltre, l'effetto dello spessore dei provini.

Quindi, in generale, il danneggiamento del materiale si manifesta con un incremento della resistenza elettrica ed un corrispettivo decremento della rigidità meccanica.

2. Danneggiamento per impatto.

Wang et al. [16] rilevano incrementi della resistenza elettrica a seguito di impatti superiori a 5 J al centro di un provino tubolare, la cui sezione rettangolare è pari a 200 mm per 10 mm. Si tratta di un tubo in composito rinforzato con fibre di carbonio, sulla cui superficie vengono posizionati quattro o più elettrodi, previa lucidatura.

3. Danneggiamento su giunzioni bullonate.

Shimamura et al. [17] [18] applicano un metodo basato sulla variazione di resistenza elettrica a seguito del danneggiamento interno di una piastra bullonata, validando ulteriormente il caso mediante un'analisi agli elementi finiti.

1.3.3 Monitoraggio del danno

Vi sono diverse pubblicazioni in merito al monitoraggio del danno relativo a laminati polimerici fibro-rinforzati con fibre di carbonio (*CFRP*). Il monitoraggio però, può essere inteso come una variazione nella misura o del potenziale elettrico o della resistenza elettrica. Si distinguono pertanto due metodi.

1. Metodo della variazione della resistenza elettrica.

- Il monitoraggio del danno per mezzo di una variazione della resistenza elettrica, richiede misurazioni della distribuzione delle variazioni della stessa, a causa di un danneggiamento misurabile, ad esempio in termini di densità di cricche.

Solitamente si utilizzano due o più elettrodi posizionati sulla superficie del laminato, ma spesso la variazione di resistenza elettrica è molto contenuta, nella migliore delle ipotesi, qualche punto percentuale. Come soluzione al problema, Todoroki et al. [21] realizzano un circuito con un ponte elettrico, per ottenere un segnale in uscita più elevato. Il danneggiamento riscontrato è inteso in termini di delaminazioni su laminati *cross-ply* (*Electrical Bridge Circuit*).

Un'ulteriore problematica riguarda le variazioni ambientali di temperatura, che in certe circostanze non possono essere trascurate, Todoroki et al. [19] realizzano un ponte elettrico aggiuntivo per compensare tali variazioni (*Temperature Compensation Bridge Circuit*).

- A seguito della misurazione del danno, in certi casi è possibile inoltre, ricavare delle informazioni aggiuntive. Todoroki et al. [19] [20] [21] infatti, riescono ad identificare posizione e dimensioni delle delaminazioni secondo la metodologia della risposta superficiale (*RSM*). Si tratta di un polinomio quadratico utilizzato per descrivere appunto la risposta della superficie del provino; la soluzione è possibile per mezzo di un'analisi *ANN* (*Artificial Neural Networks*). Si suddivide il problema secondo tre *layer*, il primo *layer* di input, per misurare variazioni di resistenza elettrica, il secondo *layer* centrale, identificato da n neuroni stabiliti in base alle prove e agli errori, infine il terzo *layer* di output, stabilisce posizione e dimensione delle delaminazioni.

2. Metodo della variazione del potenziale elettrico.

Come descritto nel paragrafo relativo al monitoraggio della deformazione (1.2) si hanno complessivamente due modalità:

- metodo a due elettrodi, quando il potenziale elettrico viene misurato tra due punti che fungono sia da contatti di misura che contatti di alimentazione;
- metodo a quattro elettrodi, quando si ha una coppia di elettrodi per l'alimentazione della corrente e una coppia di elettrodi per la misura della variazione del potenziale elettrico. Soluzione ottimale per svincolare dalle misure la resistenza di contatto.

1.4 Risultati sperimentali rilevanti

Si riportano di seguito, in maniera schematica, alcuni risultati letterali particolarmente significativi.

“Sensing delamination in a carbon fiber polymer-matrix composite during fatigue by electrical resistance measurement” [12]

- Materiale: *CFRP Cross-Ply* [0/90]_{3s}.
- Danneggiamento: delaminazioni.
- Test: prove statiche e prove cicliche di trazione fino al 57 % di σ_{1UTS} .
- Monitoraggio: metodo a 4 elettrodi per misurazioni della resistenza elettrica nella direzione dello spessore. Elettrodi trattati con vernice argentata.
- Parametri:
 - corrente continua (DC);
 - velocità di carico = 1 mm/min (per le sole prove statiche);
 - rapporto di ciclo $R = 0,05$;
 - frequenza di carico = 0,5 cicli/s.
- Risultati:
 - $\Delta R/R_0_{max} = 0,1$ per le prove statiche;
 - $\Delta R/R_0_{max} = 0,05$ per le prove cicliche fino al 60 % della vita a fatica. La resistenza elettrica aumenta ad ogni ciclo di carico e diminuisce ad ogni ciclo di scarico (*Strain Sensing*).

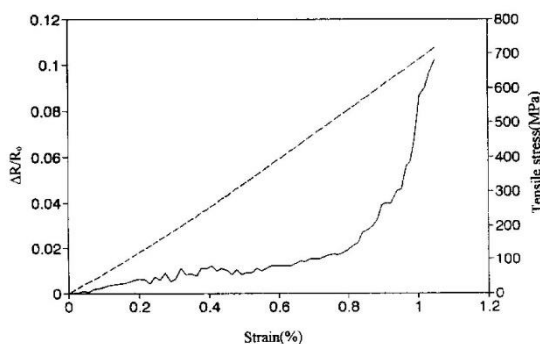


FIG.1.10 Sforzo e variazione di $\Delta R/R_0$ in funzione della deformazione, ottenuti con una prova statica fino a rottura del provino [12].

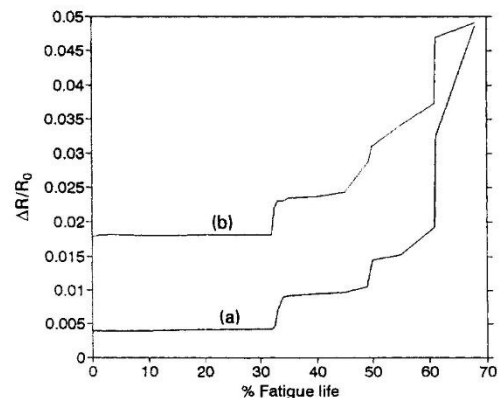


FIG.1.11 Variazione di $\Delta R/R_0$ in funzione della vita a fatica, ottenute con una prova ciclica a trazione. Curva (a) valutata alla fine di ogni ciclo e curva (b) al centro di ogni ciclo [12].

“Detection of Matrix Cracking of CFRP Using Electrical Resistance Changes” [15]

- Materiale: *CFRP Cross-Ply* $[0/90/0]_T$ $[0/90]_S$ $[0/90_2]_T$.
- Danneggiamento: rottura della matrice.
- Test: prove cicliche di carico-scarico, in funzione della massima deformazione.
- Monitoraggio: metodo a 4 elettrodi per misurazioni del potenziale elettrico nella direzione delle fibre a 0° . Elettrodi trattati con vernice argentata.
- Parametri:
 - corrente alternata (AC), 10 mA, 1 kHz.
 - fase dell'impedenza prima delle prove = 0, assicura che tutte le misurazioni successive interessino la sola fase reale, ossia la resistenza elettrica.
- Risultati:
 - $\Delta R/R_0_{\max} = 0,025\sim 0,05$.

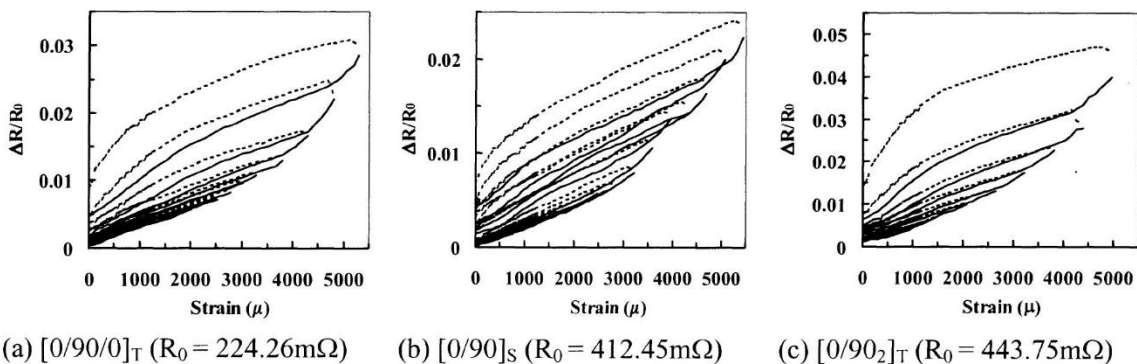


FIG.1.12 Variazione di $\Delta R/R_0$ in funzione della deformazione, per i tre tipi di provini analizzati [15].

Risultano particolarmente interessanti, le considerazioni relative alle tensioni residue in funzione degli spessori in gioco. Infatti, l'incremento di resistenza elettrica, a seguito della rottura della matrice, misurata in condizione di riposo, è troppo piccola per essere determinata su laminati con *ply* a 90° molto spessi. Difatti, poiché le tensioni residue sui *ply* a 90° sono molto contenute, le cricche, in condizione di completo scarico, si richiudono su sé stesse, garantendo comunque un minimo di continuità elettrica. Tuttavia, risollecitando il materiale, la resistenza elettrica torna ad aumentare rapidamente.

Di contro invece, con laminati aventi *ply* a 90° molto sottili, le tensioni residue sugli stessi sono molto elevate, causando, nella condizione di completo scarico, un'apertura totale delle cricche. Inoltre, lamine più sottili, a parità di sollecitazioni, presenteranno un numero di cricche matriciali superiori.

“In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements”

[11]

- Materiale: *CFRP* Unidirezionale.
- Danneggiamento: rottura dei *ply* e delaminazioni.
- Test: prove statiche a flessione post-*buckling* e prove cicliche a flessione post-*buckling*, in funzione della massima deformazione.
- Monitoraggio: metodo a 2 elettrodi per misurazioni della resistenza elettrica longitudinale (R_L) e trasversale, nella direzione della larghezza del laminato (R_{tw}) e nella direzione dello spessore (R_{tt}). Contatti elettrici realizzati per elettrodeposizione con soluzione a base di rame.
- Parametri:
 - corrente alternata (*AC*) 10 mA;
 - velocità di carico = 1,2 mm/min.
- Risultati:

durante le prove cicliche si denota un comportamento ripetitivo in termini di variazione della resistenza elettrica valutata lungo la direzione delle fibre. Tale comportamento può essere suddiviso in funzione delle fasi di carico e scarico.

 - Fase di carico e corrispettivo incremento della resistenza elettrica per:
 - allungamento delle fibre;
 - rottura delle fibre ed ulteriore allungamento, con conseguente perdita di contatto tra le estremità adiacenti delle medesime fibre rotte.
 - Fase di scarico e corrispettivo decremento della resistenza elettrica per:
 - contrazione delle fibre;
 - contatto tra le estremità delle fibre rotte, precedentemente separate.

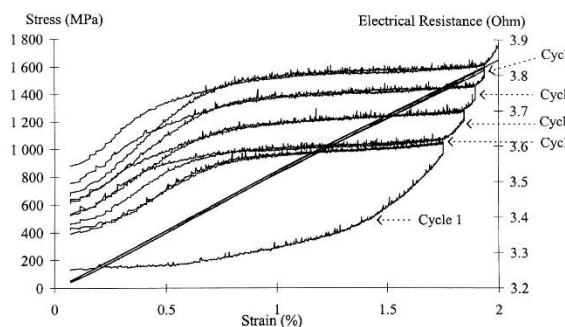


FIG.1.13 Sforzo e resistenza elettrica in funzione della deformazione per diversi cicli. Sforzo e deformazione sono riferiti alla sola parte delle fibre tese [11].

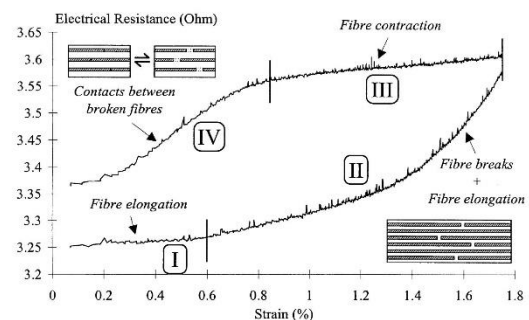


FIG.1.14 Schema delle varie fasi durante un ciclo di carico/scarico per valori inferiori alla deformazione di rottura [11].

“In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements” [3]

- Materiale: *CFRP Cross-Ply* [(90/0)₄]_s [(0/90)₄]_s.
- ❖ Monitoraggio elettrico condotto in Corrente Continua (DC)
- Danneggiamento:
 - rottura delle fibre
- Test condotti in funzione della massima deformazione:
 - prova statica a flessione post-*buckling*;
 - prova ciclica a flessione di *buckling*.
- Monitoraggio: metodo a due elettrodi per misurazioni della variazione della resistenza elettrica. Gli elettrodi sono esterni e posizionati sulla superficie delle fibre tese. Contatti elettrici realizzati per elettrodeposizione con soluzione a base di rame.
- Parametri: corrente continua (DC) 10 mA.
- Risultati: $\Delta R_{max} = 0,05$ per le prove cicliche.

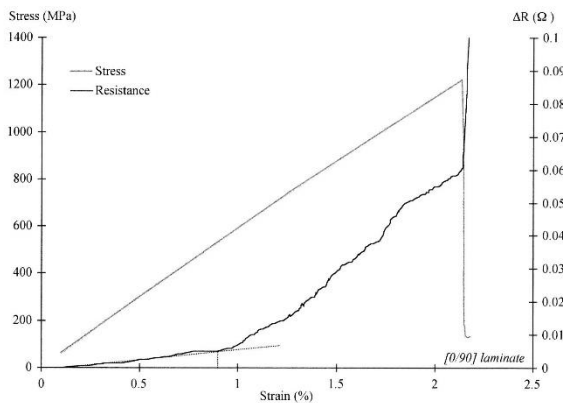


FIG.1.15 Sforzo e variazione della resistenza elettrica in funzione della deformazione, per prova statica con provini [(0/90)₄]_s [3].

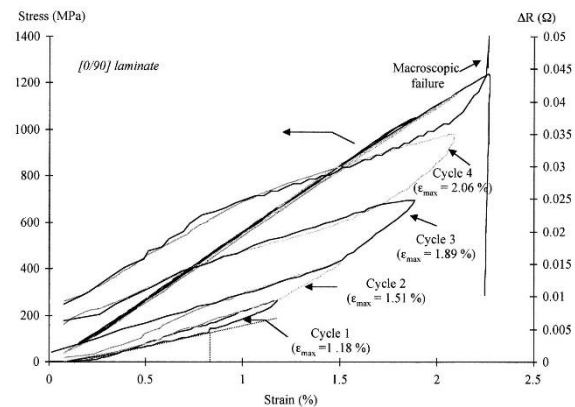


FIG.1.16 Sforzo e variazione della resistenza elettrica in funzione della deformazione, per prova ciclica con provini [(0/90)₄]_s [3].

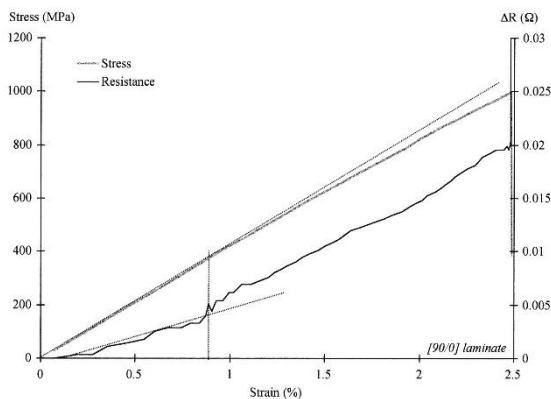


FIG.1.17 Sforzo e variazione della resistenza elettrica in funzione della deformazione, per prova statica con provini [(90/0)₄]_s [3].

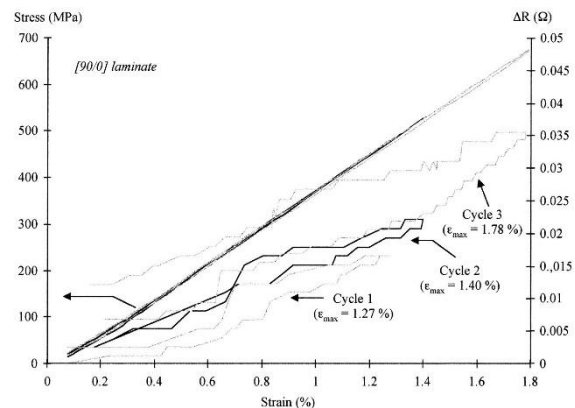


FIG.1.18 Sforzo e variazione della resistenza elettrica in funzione della deformazione, per prova ciclica con provini [(90/0)₄]_s [3].

❖ Monitoraggio elettrico condotto in Corrente Alternata (AC)

○ Danneggiamento:

- *debonding* fibra/matrice;
- delaminazioni;
- cricche trasversali.

○ Test:

- prova statica a flessione post-*buckling*.

○ Monitoraggio: metodo a 2 elettrodi per misurazioni della variazione della resistenza elettrica e della capacità. Gli elettrodi sono centrali e posizionati sulle superfici delle fibre rispettivamente tese e compresse, in corrispondenza cioè della zona di massima deformazione. Contatti elettrici realizzati per elettrodeposizione con soluzione a base di rame.

○ Parametri:

- corrente alternata (AC);
- per misurare l'impedenza: 100 kHz, 500 mV.

○ Risultati:

- $\Delta R/R_0_{max} = 0,06 \sim 0,09$;
- $\Delta C/C_0_{max} = - 0,04 \sim 0,06$.

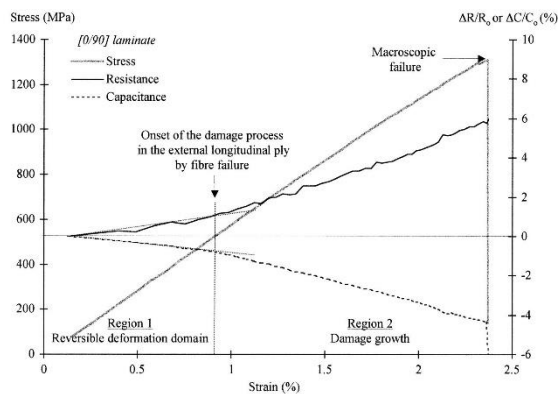


FIG.1.19 Sforzo e variazioni della resistenza e capacità elettriche, in funzione della deformazione, per prova statica con provini $[(0/90)_4]_s$ [3].

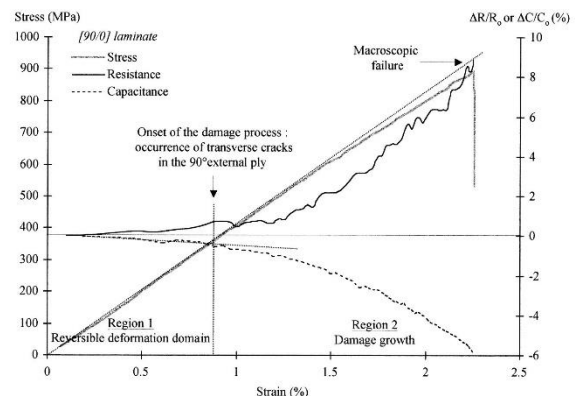


FIG.1.20 Sforzo e variazioni della resistenza e capacità elettriche, in funzione della deformazione, per prova statica con provini $[(90/0)_4]_s$ [3].

Le tecniche che utilizzano corrente continua sono maggiormente sensibili a fenomeni quali la rottura delle fibre, mentre misurazioni mediante corrente alternata, forniscono informazioni essenziali in merito allo sviluppo delle cricche matriciali e delaminazioni.

“On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method” [22]

- Materiale: *CFRP* con matrice epossidica pulita e matrice epossidica dopata per mezzo di una dispersione di *MWCNT*, *lay-up* [0/+45/90/-45]_{2s}.
- Danneggiamento: progressivo accumulo di danneggiamento fino a rottura dei campioni, convalidato da un corrispettivo calo di rigidità.
- Test: prove cicliche di trazione per tre differenti livelli di carico, 60 % σ_{UTS} , 70 % σ_{UTS} e 80 % σ_{UTS} .
- Monitoraggio:
 - metodo a 2 elettrodi per misurazioni della variazione della resistenza elettrica. Deposizione di vernice argentata sulle superfici trasversali libere dei campioni e copertura con adesivo argentato delle code che andranno serrate all'interno delle *grip* della cella di carico;
 - 2 termocoppie lungo la direzione principale del campione per misurazione della variazione della temperatura.
- Parametri:
 - corrente continua (*DC*);
 - rapporto di ciclo $R = 0,1$;
 - frequenza di carico = 5 cicli/s.
- Pre-risultati:

durante le prime rampe di carico (< 2500 cicli) si registra sempre una riduzione della resistenza elettrica, per poi stabilizzarsi ed aumentare progressivamente fino a rottura dei campioni. Motivo per cui è stato indagato il contributo della temperatura, e i risultati sono stati quindi corretti, tenendo conto dell'influenza della stessa, secondo quanto segue:

$$(R_0 + \Delta R_{damage}) = R_{corrected} = R_{temp-free} = (R_{exp} - \Delta R_{thermal}) \quad (1.6)$$

R_{exp} rappresenta il valore reale di resistenza elettrica misurata, mentre $\Delta R_{thermal}$ rappresenta la variazione di resistenza elettrica per il solo contributo legato a cambiamenti della temperatura esterna, proporzionale al cambiamento stesso, secondo un opportuno coefficiente A .

$$\Delta R_{thermal} = A \cdot \Delta T \quad , \quad \Delta T = (T - T_0) \quad (1.7a)$$

$$A = -11e^{-5} Ohm/^{\circ}C \quad (CFRP \text{ con matrice epossidica pulita}) \quad (1.7b)$$

$$A = -13e^{-5} Ohm/^{\circ}C \quad (CFRP \text{ con matrice epossidica dopata}) \quad (1.7c)$$

○ Risultati:

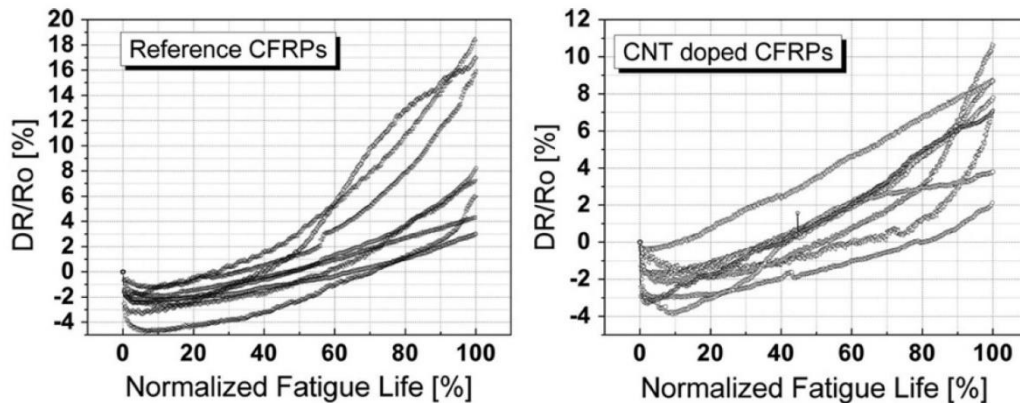


FIG.1.21 Variazione normalizzata della resistenza elettrica in funzione della vita a fatica normalizzata per vari provini a tutti i livelli di carico [22].

Stress level	Material	$(\Delta R/R_o)_{max}$
1 (80% of σ_{uts})	Reference quasi-isotropic CFRP	5.66 ± 2.86 [%]
	CNT-doped quasi-isotropic CFRP	5.59 ± 2.27 [%]
3 (60% of σ_{uts})	Reference quasi-isotropic CFRP	17.06 ± 4.76 [%]
	CNT-doped quasi-isotropic CFRP	10.23 ± 1.62 [%]

TAB.1.1 Variazione massima di resistenza $(\Delta R/R_o)_{max}$ per entrambi i materiali a livelli di carico uno e tre [22].

La presenza di nanotubi all'interno della matrice epossidica, riduce il grado di ortotropia elettrica del materiale, aumenta infatti di qualche ordine di grandezza la conducibilità della matrice, anche se il fenomeno è mascherato dall'elevata conducibilità elettrica delle fibre di carbonio. I nanotubi aumentano il contatto elettrico tra fibre adiacenti ma complessivamente sembrano ridurre la variazione di resistenza elettrica misurata. Infatti, a parità di livello di carico si registrano valori di $(\Delta R/R_o)_{max}$ inferiori rispetto ai provini con matrice epossidica non dopata.

“Experimental investigation of fatigue destruction of CFRP using the electrical resistance change method” [23]

- Materiale: CFRP e GFRP secondo lo schema in Figura 1.22.

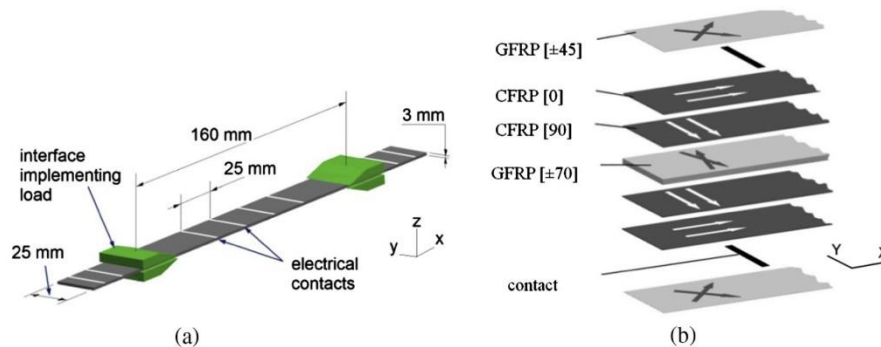


FIG.1.22 Struttura del provino: (a) vista generale; (b) struttura interna [23].

Si utilizzano laminati in fibra di vetro per isolare e mantenere divisi i laminati dalla parte delle fibre tese e quelli dalla parte delle fibre compresse.

- Danneggiamento: in generale si parla di distruzione (*destruction*) dei provini, vengono comunque osservate delaminazioni e cricche.
- Test: prove statiche e cicliche per mezzo di un sistema che permette di avere pura flessione e garantisce valori di deflessione compresi tra 0 – 40 mm.
- Monitoraggio: 8 elettrodi al di fuori della zona soggetta a flessione e 8 elettrodi nella zona centrale, come si osserva in figura 1.23.

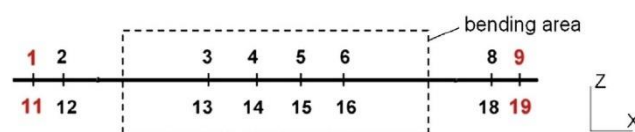


FIG.1.23 Sequenza e numerazione dei contatti del provino [23].

- Parametri:
 - corrente continua (DC), $20 \pm 0,001$ mA, tra i contatti 1-9 e i contatti 11-19;
 - rapporto di ciclo $R = 0\sim 1$;
 - carico massimo = 80 % della forza massima che porta a rottura i provini durante le prove statiche.
- Risultati:
 - $\Delta R/R_0_{max} = 3,5$ per le prove statiche (contatti 14-15);
 - $\Delta R/R_0_{max} = 0,96$ per le prove cicliche (contatti 14-15).

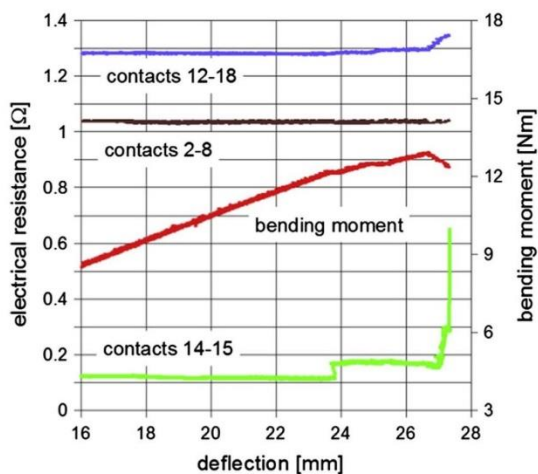


FIG.1.24 Momento flettente e resistenza tra i contatti selezionati in funzione della deflessione per i provini scelti [23].

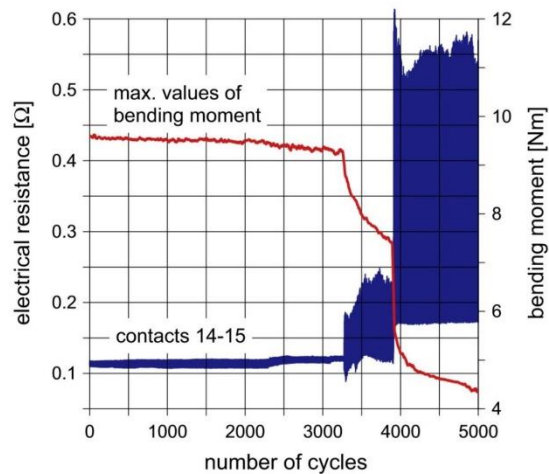


FIG.1.25 Involuppo del momento flettente massimo e della resistenza in funzione del numero di cicli tra i contatti interni.

L'utilizzo di una struttura ibrida con un'anima in fibra di vetro, permette lo studio simultaneo del comportamento a trazione e compressione del provino garantendo una perfetta indipendenza tra le due zone. Nello specifico si osserva un'influenza nella variazione della resistenza elettrica da parte della deformazione delle fibre di carbonio, ossia la variazione della loro lunghezza. In particolare, all'interno di ogni singolo ciclo, prima del danneggiamento, quando il momento flettente aumenta, la resistenza elettrica aumenta dalla parte delle fibre tese, e diminuisce dalla parte delle fibre compresse. Tuttavia, la variazione non è speculare, complessivamente l'ampiezza valutata nel *layer* in trazione è maggiore rispetto alla corrispettiva valutata nel *layer* in compressione per un valore pari al 2,5 %. Invece, situazione diametralmente opposta nel momento in cui il provino inizia a danneggiarsi, mostrando una sensibilità maggiore dalla parte compressa. Si sottolinea come alla fine di ogni prova, le fibre longitudinali, dalla parte in compressione, giungano sempre a rottura. Pertanto, durante un singolo ciclo, si verificano le seguenti due situazioni:

- 1) il provino viene inflesso, le estremità delle fibre rotte, in una sezione trasversale danneggiata, sono in contatto l'una con l'altra;
- 2) il provino è scarico, le estremità delle fibre rotte sopra menzionate, si separano causando un incremento della resistenza elettrica.

Quindi, più fibre sono rotte, maggiore sarà il danneggiamento percepito. Nello specifico il valore medio massimo registrato dalla parte delle fibre compresse, tra due contatti interni adiacenti (25 mm) è pari a 0,56 Ω, in condizioni di scarico. Mentre, il corrispettivo valore registrato, quando il provino raggiunge la massima inflessione, è pari a 0,2 Ω (- 280 %).

“Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes” [24]

- Materiale: CFRP Cross-Ply $[0_2/90_2]_s$.
- Danneggiamento: delaminazioni e cricca trasversale con configurazione a Z.
- Test: carico statico con prova a flessione a tre punti (test a taglio interlaminare).
- Monitoraggio: 2 elettrodi opposti (Figura 1.26).

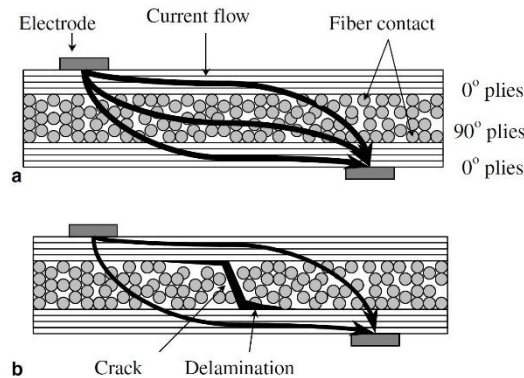


FIG.1.26 Schema di una struttura in composito carbonio/epossidica quando viene applicata una corrente elettrica.

- (a) Collegamento elettrico tra le fibre in un laminato CFRP.
- (b) Il collegamento elettrico viene interrotto da una delaminazione [24].

- Parametri:
 - oscillatore ceramico come sensore, connesso agli elettrodi e costituito da:
 - amplificatore differenziale (circuito DC);
 - circuito oscillante (AC).
 - $f < 10$ kHz, poiché la fase dell'impedenza del provino è pari a 0° (comportamento perfettamente resistivo);
 - velocità di carico = 0,1 mm/min.

○ Risultati

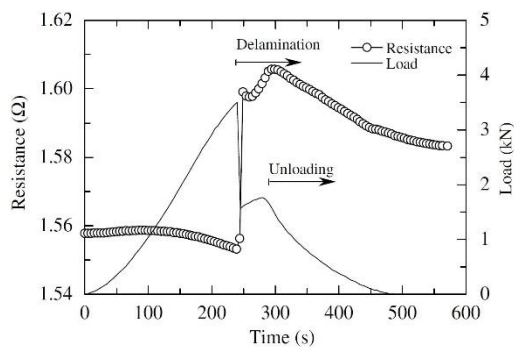


FIG.1.27 Variazione della resistenza elettrica a causa di una delaminazione [24].

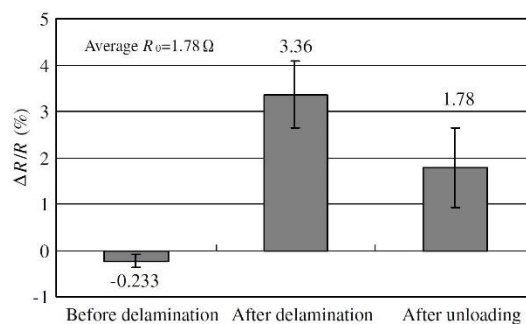


FIG.1.28 Variazione della resistenza elettrica a causa di una delaminazione (media di nove provini) in quattro situazioni; $R_{iniziale}$, pre delaminazione, post delaminazione e post scarico [24].

Complessivamente si osserva una riduzione della resistenza elettrica prima che il provino delamini, variazione reversibile scaricando il campione. Invece, l'insorgere della delaminazione interrompe il collegamento elettrico tra gli strati a 0° e gli strati a 90°, causando un innalzamento pressoché istantaneo della resistenza elettrica. Successivamente, durante la fase di scarico, una parte del danneggiamento si richiude, comportando una leggera risalita della conducibilità interna e dunque un corrispettivo calo della resistenza. I risultati ottenuti vengono poi confrontati con i valori analizzati per mezzo di un frequenzimetro, collegato in wireless, all'oscillatore ceramico, grazie ad un'antenna ricevente; in particolar modo viene esaminata la variazione della frequenza elettrica dell'onda emessa dal sensore.

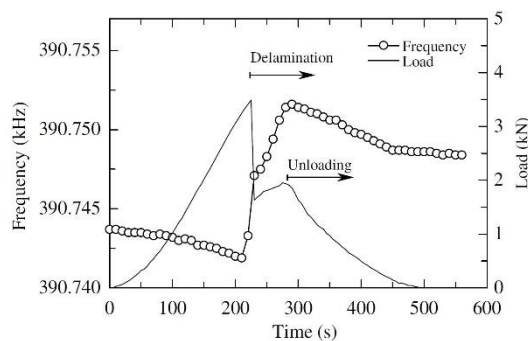


FIG.1.29 Variazione della frequenza elettrica a causa di una delaminazione [24].

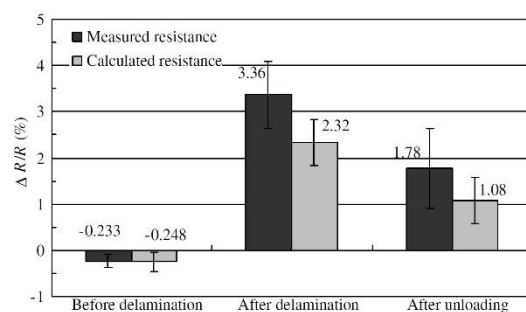


FIG.1.30 Confronto tra la resistenza elettrica misurata e la resistenza elettrica convertita dal frequenzimetro.

Le differenze che si denotano in Figura 1.30 sono dovute al fatto che i test corrispettivi sono stati eseguiti in tempi diversi e questo ha causato errori sperimentali e variazioni alla superficie di contatto della zona danneggiata.

1.5 Referenze

- [1] Marino Quaresimin, *Progettazione di componenti e strutture in materiale composito*, Slides Processi, 2018, p.83-89.
- [2] Paolo Andrea Carraro, Michele Zappalorto, Marino Quaresimin, *Health monitoring of cross-ply laminates: Modelling the correlation between damage evolution and electrical resistance change*, Composites: Part A, 82, 2016, p.151-158.
- [3] J.C. Abry, Y.K. Choi, A. Chateauminois, B. Dalloz, G. Giraud, M. Salvia, *In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements*, Composites Science and Technology, 61, 2001, p.855-864.
- [4] Akira Todoroki, Masahito Ueda, Yoshiyasu Hirano, *Strain and Damage Monitoring of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistance Measurement*, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.1 No.8, 2007, p.947-974.
- [5] Schulte, K and Baron, Ch., *Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistance measurement*, Composite Science and Technology, 36, 1989, p.63-76.
- [6] Wang S., Chung D.D.L., *Piezoresistance in continuous carbon fiber polymer-matrix composite*, Polymer Composites, 21, 2000, p.13-19.
- [7] Angelidis N., Wei C.Y., Irving P.E., *The electrical resistance response of continuous carbon fiber composite laminates to mechanical strain*, Composites Part A, 35, 2004, p.1135-1147.
- [8] Todoroki A., Yoshida J., *Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load*, JSME Int. J. Series A, 47, 2004, p.357-364.
- [9] Todoroki A., and Yoshida J., *Apparent negative piezoresistance of single-ply CFRP due to poor electrical contact of four probe method*, Key Engineering Materials, 297-299, 2005, p.610-615.
- [10] Marino Quaresimin, *Progettazione di componenti e strutture in materiale composito*, Slides Criteri di Resistenza, 2018, p.01-12.
- [11] J.C. Abry, S. Bochard, A. Chateauminois, M. Salvia, G. Giraud, *In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements*, Composites Science and Technology, 59, 1999, p.925-935.
- [12] Wang X., Chung D.D.L., *Sensing delamination in a carbon fiber polymer-matrix composite during fatigue by electrical resistance measurement*, Polymer Composite, 18, 1997, p.692-700.

- [13] Irving P.E., Thiagarajan C., *Fatigue damage characterization in carbon fiber composite materials using an electrical potential technique*, Smart materials and structures, 7, 1998, p.456-466.
- [14] Weber I., Schwarts P., *Monitoring bending fatigue in carbon-fiber/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance technique*, Composites Science and Technology, 61, 2001, p.849-853.
- [15] Kazuomi Omagari, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, *Detection of Matrix Cracking of CFRP Using Electrical Resistance Changes*, Key Engineering Materials, 297-300, 2005, p.2096-2101.
- [16] Wang S., Chung D.D.L. and Chung J.H., *Impact damage of carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement*, Composites Part A, 36, 2005, p.1707-1715.
- [17] Shimamura Y., Oda K., Todoroki A., Kobayashi H., and Inada T., *Application of electric resistance change method to damage detection of CFRP bolted joints*, Key Engineering Materials, 297-300, 2005, p.653-656.
- [18] Shimamura Y., Oda K., Todoroki A. and Ueda M., *Detectability of bearing failure of composite bolted joints by electrical resistance change method*, Key Engineering Materials, 321-325, 2007, p.975-962.
- [19] Todoroki A., Tanaka Y. and Shimamura Y., *Electric resistance change method for identification of embedded delamination of CFRP plates*, Materials Science Research International, Special Technical Publication-2, 2001, p.139-145.
- [20] Todoroki A., *Effect of number of electrodes and diagnostic tool for delamination monitoring of graphite/epoxy laminates using electric resistance change*, Composites Science and Technology, 61, 2001, p.1871-1880.
- [21] Todoroki A. and Tanaka Y., *Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method*, Composite Science and Technology, 62, 2002, p.629-639.
- [22] Vavouliotis A., Paipetis A., Kostopoulos V., *On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method*, Composite Science and Technology, 71, 2011, p.630-642.
- [23] Jacek Gadomski, Pawel Pyrzanowski, *Experimental investigation of fatigue destruction of CFRP using the electrical resistance change method*, Measurement, 87, 2016, p.236-245.

- [24] Ryosuke Matsuzaki, Akira Todoroki, *Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes*, Composite Science and Technology, 66, 2006, p.407-416.

STIMA DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA DI UN LAMINATO NON DANNEGGIATO

2.1 Introduzione

[1] “Un laminato è costituito da due o più lamine unidirezionali (o tessute) sovrapposte, come rappresentato in Figura 2.1, tra loro perfettamente aderenti, che agiscono come un unico elemento strutturale. La sequenza di sovrapposizione (*lay-up*) e l’orientamento delle singole lamine deve essere definito in modo da ottenere un elemento strutturale in grado di fornire caratteristiche di rigidità e resistenza adeguate ai requisiti progettuali. La risposta strutturale di un laminato alle sollecitazioni esterne è calcolabile attraverso opportune procedure che siano in grado di considerare il numero, il tipo, l’orientazione e la mutua posizione delle lamine che costituiscono il laminato stesso. La più affidabile di queste procedure è la teoria classica della laminazione (*CLT*).”

In questo capitolo si implementerà una versione alternativa della *CLT* che consideri sollecitazioni esterne e corrispondenti risposte del laminato da un punto di vista elettrico. Pertanto, date le proprietà elettriche del materiale, e sollecitazioni esterne in termini di una o più correnti elettriche indotte, si calcolano le corrispondenti proprietà elettriche nel sistema di riferimento di struttura (risposta elettrica strutturale). Nello specifico si esamina un laminato con *lay-up* $[\theta_1/\theta_2]_s$. L’analisi sarà di tipo piano e interesserà solamente metà del laminato, trattandosi di un laminato simmetrico, allo stato non danneggiato.

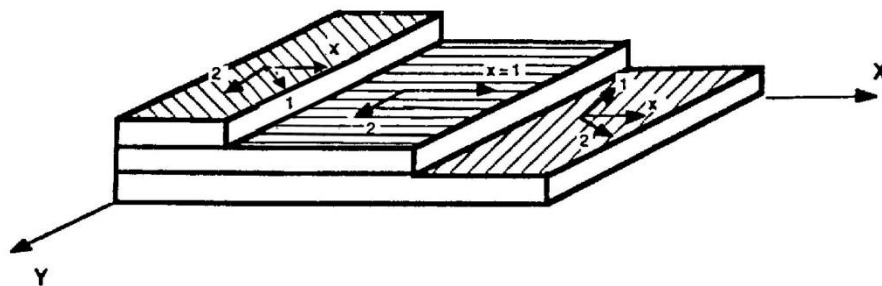


FIG.2.1 Esempio di laminato [1].

2.2 Implementazione

Secondo la legge di Ohm si ha che il campo elettrico è proporzionale al prodotto tra la resistività propria del conduttore e la densità di corrente elettrica.

$$E = \eta \cdot j \quad (2.1)$$

Quindi, nel sistema di riferimento delle singole lamine (1,2), si ottengono le seguenti espressioni matriciali:

$$\begin{Bmatrix} e_1^i \\ e_2^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11}^i & 0 \\ 0 & \Gamma_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} j_1^i \\ j_2^i \end{Bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{Bmatrix} j_1^i \\ j_2^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_{11}^i & 0 \\ 0 & \Pi_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} e_1^i \\ e_2^i \end{Bmatrix} \quad (2.2a/b)$$

$$[\Gamma^i] = \begin{bmatrix} \eta_1^i & 0 \\ 0 & \eta_2^i \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad [\Pi^i] = [\Gamma^i]^{-1} \quad (2.3a/b)$$

Mentre nel sistema di riferimento principale del laminato (X,Y) sapendo che [2]:

$$[\bar{\Gamma}^i(\theta)] = [T_0(\theta)][\Gamma^i][T_0(\theta)]^{-1} \quad (2.4)$$

$$[\bar{\Pi}^i] = [\bar{\Gamma}^i]^{-1} \quad (2.5)$$

$$[T_0(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{matrice di rotazione convenzionale}) \quad (2.6)$$

si ottiene:

$$\begin{Bmatrix} e_x^i \\ e_y^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{11}^i & \bar{\Gamma}_{12}^i \\ \bar{\Gamma}_{21}^i & \bar{\Gamma}_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} j_x^i \\ j_y^i \end{Bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{Bmatrix} j_x^i \\ j_y^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Pi}_{11}^i & \bar{\Pi}_{12}^i \\ \bar{\Pi}_{21}^i & \bar{\Pi}_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} e_x^i \\ e_y^i \end{Bmatrix} \quad (2.7a/b)$$

In particolare, poiché tutto il laminato sarà sottoposto al medesimo/i campo/i elettrico/i, possiamo assumere che $e_x^1 = e_x^2 = e_x$ e $e_y^1 = e_y^2 = e_y$.

Inoltre, da un punto di vista elettrico, le lamine che costituiscono il laminato possono essere discretizzate come dei resistori in parallelo, ciascuno avente le proprie resistività apparenti nel sistema di riferimento del laminato. Pertanto, la corrente che attraversa il laminato, per la condizione di stazionarietà, è pari alla somma delle correnti che si diramano nelle singole lamine.

E poiché si vuole applicare un solo campo elettrico lungo la direzione principale del laminato (x), la densità di corrente lungo y sarà complessivamente nulla. Quindi, ipotizzato che $I_y = 0$ e, considerate le precedenti ipotesi, si ottengono le seguenti espressioni.

Si indicano con L_x, w, h_1, h_2 rispettivamente, lunghezza e larghezza del laminato, e spessori della prima e seconda lamina.

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_x^1 + I_x^2 = j_x^1 \cdot h_1 \cdot w + j_x^2 \cdot h_2 \cdot w \\
 &= h_1 \cdot w \cdot (\bar{\Pi}_{11}^1 \cdot e_x^1 + \bar{\Pi}_{12}^1 \cdot e_y^1) + h_2 \cdot w \cdot (\bar{\Pi}_{11}^2 \cdot e_x^2 + \bar{\Pi}_{12}^2 \cdot e_y^2) \\
 &= [(h_1 \cdot \bar{\Pi}_{11}^1 + h_2 \cdot \bar{\Pi}_{11}^2), (h_1 \cdot \bar{\Pi}_{12}^1 + h_2 \cdot \bar{\Pi}_{12}^2)] \cdot \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \end{Bmatrix} \cdot w \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_y &= I_y^1 + I_y^2 = j_y^1 \cdot h_1 \cdot w + j_y^2 \cdot h_2 \cdot w \\
 &= h_1 \cdot w \cdot (\bar{\Pi}_{21}^1 \cdot e_x^1 + \bar{\Pi}_{22}^1 \cdot e_y^1) + h_2 \cdot w \cdot (\bar{\Pi}_{21}^2 \cdot e_x^2 + \bar{\Pi}_{22}^2 \cdot e_y^2) \\
 &= [(h_1 \cdot \bar{\Pi}_{21}^1 + h_2 \cdot \bar{\Pi}_{21}^2), (h_1 \cdot \bar{\Pi}_{22}^1 + h_2 \cdot \bar{\Pi}_{22}^2)] \cdot \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \end{Bmatrix} \cdot w \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

Complessivamente nel sistema di riferimento del laminato si avrà quindi:

$$\begin{Bmatrix} I_x \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \end{Bmatrix} \cdot w \quad \rightarrow \quad \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_x \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot \frac{1}{w} \quad (2.10a/b)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^2 h_k \cdot \bar{\Pi}_{ij}^k \quad i, j = 1, 2 \quad \rightarrow \quad [a_{ij}] = [A_{ij}]^{-1} \quad (2.11a/b)$$

Richiamando le leggi di Ohm si conclude:

$$V_x = e_x \cdot L_x = \left(a_{11} \cdot I_x \cdot \frac{1}{w} \right) \cdot L_x \quad (2.12)$$

$$R_{x0} = \frac{V_x}{I_x} = a_{11} \cdot L_x \cdot \frac{1}{w} \quad (2.13)$$

$$\boldsymbol{\eta}_{x0} = R_{x0} \frac{A}{L_x} = a_{11} \cdot A \cdot \frac{1}{w} = a_{11} \cdot (\mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2) \quad (2.14)$$

Si ottiene così, la resistività complessiva del laminato, valutata lungo la direzione principale x, allo stato non danneggiato.

2.3 Resistività apparente della singola lamina

In base a quanto esplicitato al paragrafo precedente e in funzione delle medesime ipotesi:

$$\begin{Bmatrix} e_x^i \\ e_y^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{11}^i & \bar{\Gamma}_{12}^i \\ \bar{\Gamma}_{21}^i & \bar{\Gamma}_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} j_x^i \\ j_y^i \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} e_x^i \\ e_y^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{11}^i & \bar{\Gamma}_{12}^i \\ \bar{\Gamma}_{21}^i & \bar{\Gamma}_{22}^i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} j_x^i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.15a/b)$$

$$e_x^i = \bar{\Gamma}_{11}^i \cdot j_x^i + \bar{\Gamma}_{12}^i \cdot 0 \rightarrow \bar{\Gamma}_{11}^i = \frac{e_x^i}{j_x^i} = \eta_{x0}^i \quad (2.16a/b)$$

Quindi, riportando il termine (1,1) della matrice $[\Gamma]$ in funzione dell'angolo di *off-axis* teta (compreso tra 0° e 90°) si ottengono i valori della resistività apparente della singola lamina, valutata lungo la direzione principale del laminato, allo stato non danneggiato.

Come resistività nel sistema di riferimento del materiale si considerano i valori riportati di seguito; fanno riferimento ad una lamina generica in fibra di carbonio, con matrice epossidica dopata, per mezzo di nanotubi di carbonio [3].

$$\eta_1 = 0.0303 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_2 = 114 [\Omega \cdot mm]$$

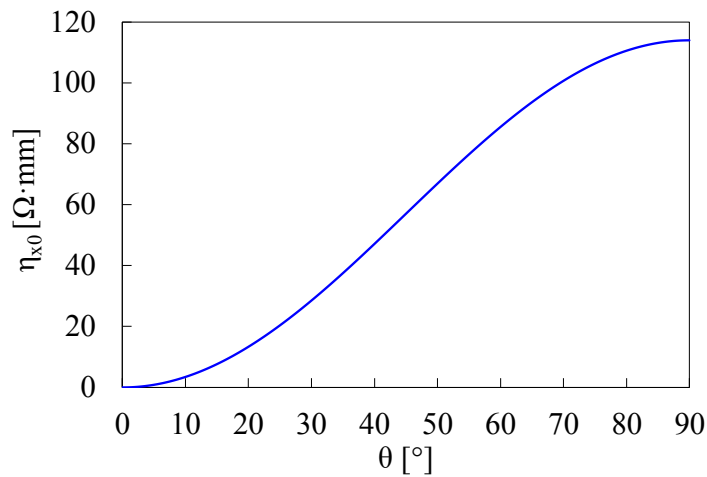


FIG.2.2 Resistività apparente della singola lamina valutata lungo la direzione principale del laminato allo stato non danneggiato, in funzione dell'angolo di *off-axis*.

2.4 Referenze

- [1] Marino Quaresimin, *Introduzione alla progettazione con i materiali compositi*, 2009, p.57-70.
- [2] Francesco Panozzo, Michele Zappalorto, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical resistance change vs damage state in cracked symmetric laminates: A closed form solution*, *Composite Structures*, 184, 2018, p.1081-1091.
- [3] Michele Zappalorto, Francesco Panozzo, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments*, *Composite Science and Technology*, 143, 2017, p.31-45.

STIMA DELLA RESISTENZA ELETTRICA DI UN LAMINATO DANNEGGIATO

3.1 Introduzione

Si descrive brevemente il modello analitico analizzato [1], relativo alla perdita di rigidità su laminati simmetrici conduttivi, a seguito della presenza di cricche, come funzione della variazione della resistenza elettrica, intrinseca al laminato. Inizialmente viene posta l'attenzione al problema elettrico. Si considerano laminati aventi *lay-up* del tipo $[(\theta_1)_n/(\theta_2)_m]_s$ realizzati mediante sovrapposizione di singoli *ply* unidirezionali, posizionati secondo opportuni angoli di *off-axis* pari a θ_1 e θ_2 . Si suppone che i *layer*, con orientazione delle fibre pari a θ_2 , siano criccati e che una corrente continua I_x sia iniettata attraverso la superficie del laminato, come mostrato in Figura 3.1 (a). Trattandosi di un laminato simmetrico, l'analisi si circoscrive alla sola parte simmetrica superiore. Inoltre, con il fine di semplificare la descrizione matematica del problema, sono adottate le seguenti ipotesi:

- le cricche sono parallele alla direzione delle fibre nel solo *layer* danneggiato, avente orientazione delle fibre stesse pari a θ_2 ;
- le cricche sono spaziate in maniera uniforme, con una distanza pari ad L (si veda Figura 3.1 (b)), ed interessano l'intera larghezza del laminato. In questo modo la densità di cricche può essere così espressa $\rho=1/L$.

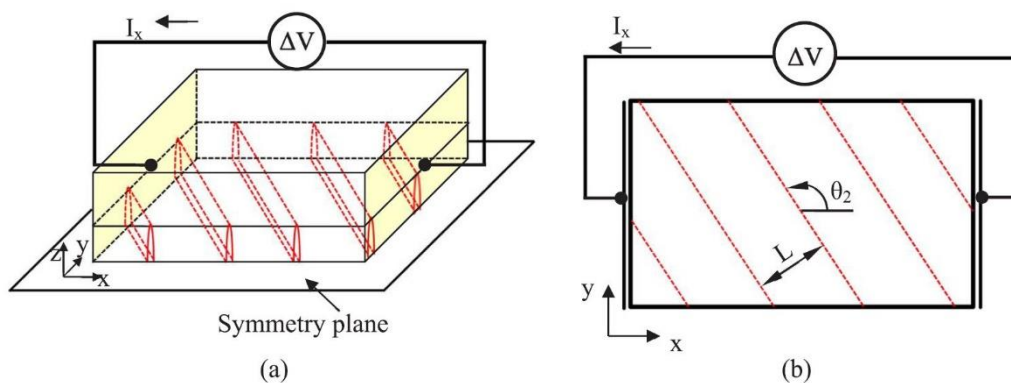


FIG.3.1 (a) Rappresentazione schematica di un laminato criccato, la corrente viene iniettata attraverso le aree gialle. (b) Vista dall'alto del laminato [1].

Successivamente, sulla base delle ipotesi precedenti, Panozzo et al. [1], riducono l'analisi ad un elemento di volume rappresentativo (*RVE*) compreso tra due cricche adiacenti (Figura 3.2). In questo modo si svincola qualsiasi effetto di bordo.

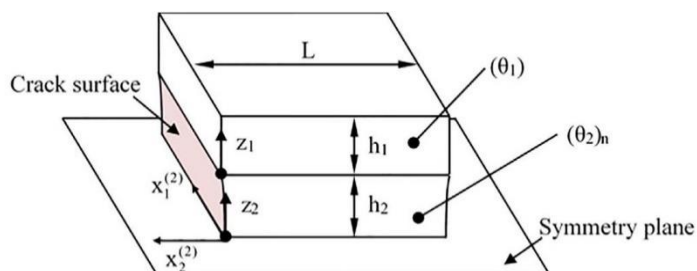


FIG.3.2 *RVE* del laminato criccato [1].

Per l'analisi elettrica si assume un comportamento ortotropo per ogni *layer*, in termini di resistività. Si avranno pertanto, due valori di resistività in piano, uno parallelo e l'altro perpendicolare rispetto alla direzione delle fibre (rispettivamente η_1 e η_2); ed un valore di resistività fuori dal piano (η_z). Si risolve il problema considerando che, a causa delle cricche, la densità di corrente elettrica non è costante lungo il laminato, contribuendo ad una variazione del potenziale elettrico in funzione della coordinata z . Si giunge ad esplicitare la densità di cricche come funzione dell'incremento di resistenza elettrica.

Per la parte meccanica, per mezzo di un modello *shear lag*, si correla la perdita di rigidità del laminato in funzione della densità di cricche. Infine, avendo un minimo comun denominatore (ρ), si riesce a prevedere il calo di rigidità meccanica in funzione di un incremento di resistenza elettrica, valutata lungo la direzione principale del laminato, a seguito di un danneggiamento in termini di *crack density*. Il tutto viene convalidato mediante un'analisi agli elementi finiti, previa imposizione di opportune condizioni al contorno di periodicità. Si riportano alcuni risultati a titolo di esempio.

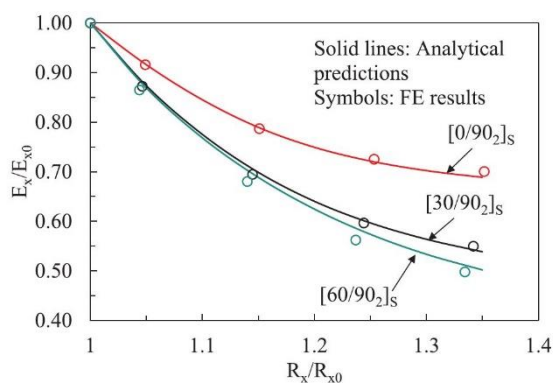


FIG.3.3 Influenza dell'angolo θ_1 sulla risposta elettrico/meccanica del laminato criccato [1].

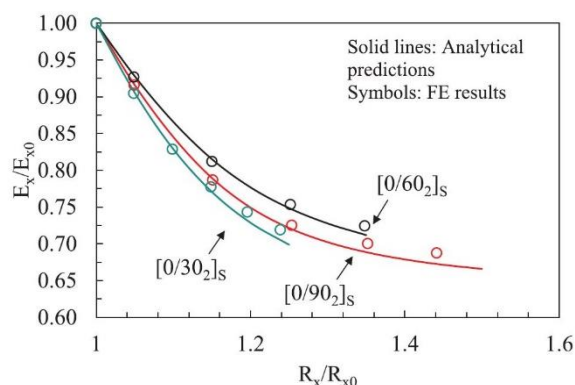


FIG.3.4 Influenza dell'angolo θ_2 sulla risposta elettrico/meccanica del laminato criccato [1].

3.2 Applicazione del modello a laminati GFRP [2]

Il primo obiettivo della presente tesi è quello di dimostrare sperimentalmente l'incremento di resistenza elettrica a seguito di un progressivo incremento di *crack density* in un laminato in fibra di carbonio con matrice epossidica dopata.

Avendo a disposizione un file, realizzato dall'Ing. Panozzo tramite un codice di calcolo commerciale, che implementa il modello matematico i cui risultati sono stati descritti nel paragrafo precedente, si testa il funzionamento del file. Si consideri la sola parte elettrica, relativa cioè alla variazione di resistenza al variare della *crack density* su laminati $[(\theta_1)_n/(\theta_2)_m]_s$.

Inizialmente si verificano i dati riportati in Figura 3.5, testando quindi laminati $[0/90_n]_s$ GFRP. Per ciascun *lay-up* si è riportato il valore R_x/R_{x0} per valori di *crack density* pari a 0,5 [cricche/mm] e 1 [cricche/mm].

Per la verifica si sono utilizzati i seguenti valori di resistività nel sistema di riferimento delle singole lamine [2]:

$$\eta_{11} = 61450 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{22} = 132170 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{33} = 70810 [\Omega \cdot mm]$$

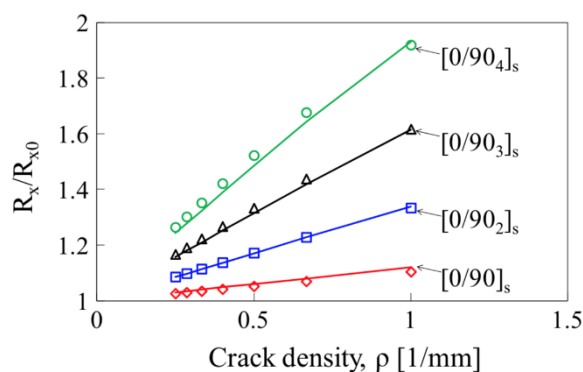


FIG.3.5 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati *cross-ply* [2].

	ρ [1/mm]	0,5	1	Verifica
Lay-up				
$[0/90]_s$	R_x / R_{x0}	1,05981	1,11952	ok
$[0/90]_2s$	R_x / R_{x0}	1,17043	1,33797	ok
$[0/90]_3s$	R_x / R_{x0}	1,31443	1,61429	ok
$[0/90]_4s$	R_x / R_{x0}	1,48523	1,93006	ok

TAB.3.1 Confronto dei risultati analitici ottenuti, con i risultati riportati in Figura 3.5.

Appurato che il programma funzioni si procede con laminati in fibra di carbonio.

3.3 Applicazione del modello a laminati CFRP

Si prosegue analizzando laminati in fibra di carbonio con matrice epossidica dopata per mezzo di nanotubi di carbonio, i cui valori di resistività nel sistema di riferimento delle singole lamine sono riportati di seguito [3]:

$$\eta_{11} = 0,0303 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{22} = \eta_{33} = 114 [\Omega \cdot mm]$$

Si esaminano dapprima laminati *cross-ply* con numero di lamine dello strato criccato crescenti; si ricorda che gli spessori delle singole lamine vengono considerati pari a $0,3 \text{ mm}$ volendosi avvicinare il più possibile a quanto esplicitato negli articoli analizzati [1] [2] relativi a *GFRP*. Si sottolinea inoltre, che il modello prevede la presenza di un solo strato criccato (numero 2) indipendentemente dagli angoli delle rispettive lamine, dove con strato si intende il complesso di lamine aventi inclinazione pari a θ_2 .

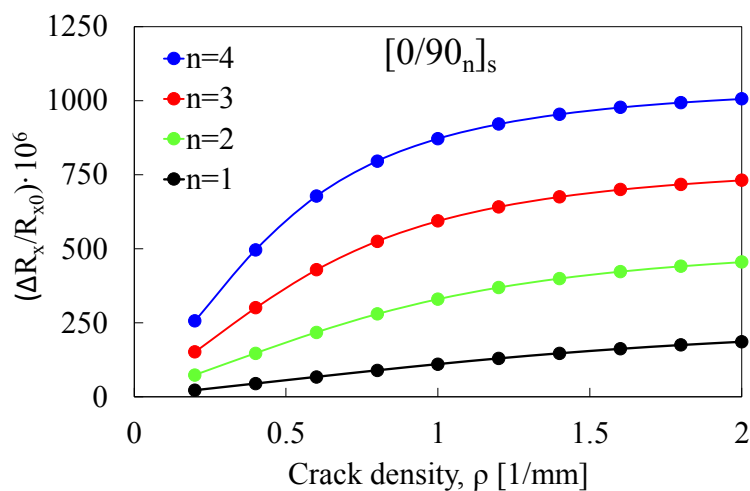


FIG.3.6 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[0/90_n]_s$.

Come si può osservare, i trend sono molto simili a quelli riportati in Figura 3.5.

Nel complesso ci si aspettano sempre delle funzioni monotone crescenti che tendono ad un asintoto orizzontale quando si giunge a saturazione in termini di *crack density*.

Si tratta comunque di variazioni poco significative, il massimo incremento di resistenza infatti, si verifica per valori di *crack density* pari a 2 su laminati $[0/90_4]_s$ ed è solamente dello 0,1 %. Si decide quindi di testare tre diverse configurazioni del tipo $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ con valori di teta pari a 30° , 45° e 60° . Si sono scelti questi *lay-up* poiché si vuole avere una visione generale di cosa può succedere per angoli compresi tra 0° e 90° e perché si tratta di configurazioni standard, realizzabili/facilmente riproducibili in laboratorio.

Si riportano di seguito tutti i risultati ottenuti.

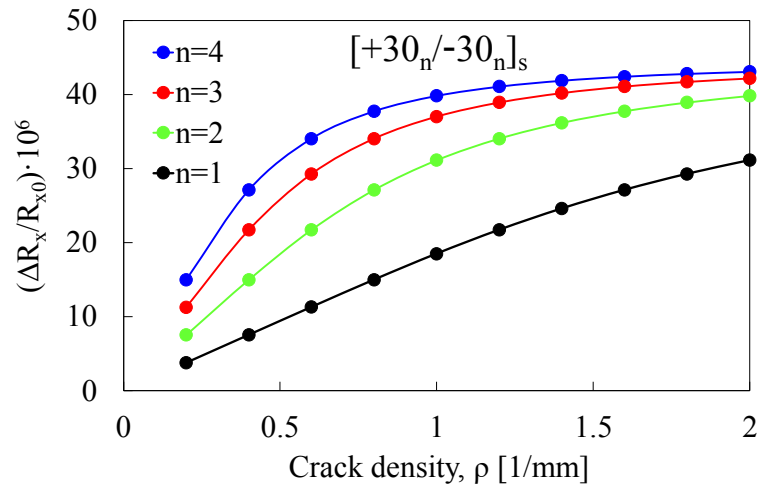


FIG.3.7 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+30_n/-30_n]_s$.

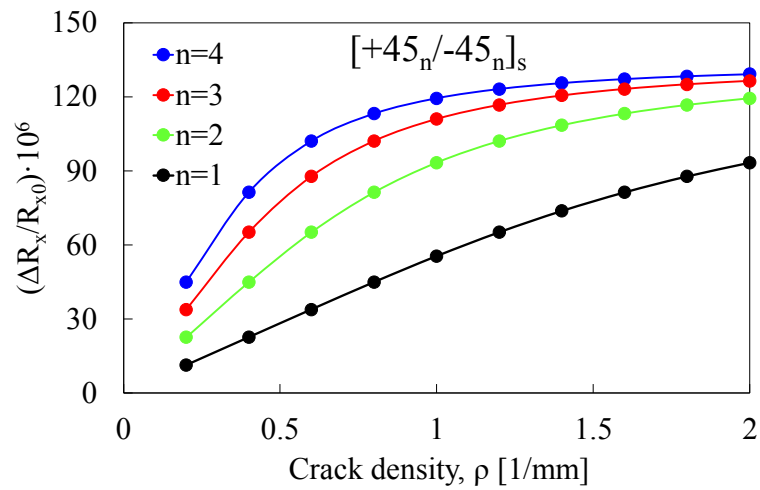


FIG.3.8 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+45_n/-45_n]_s$.

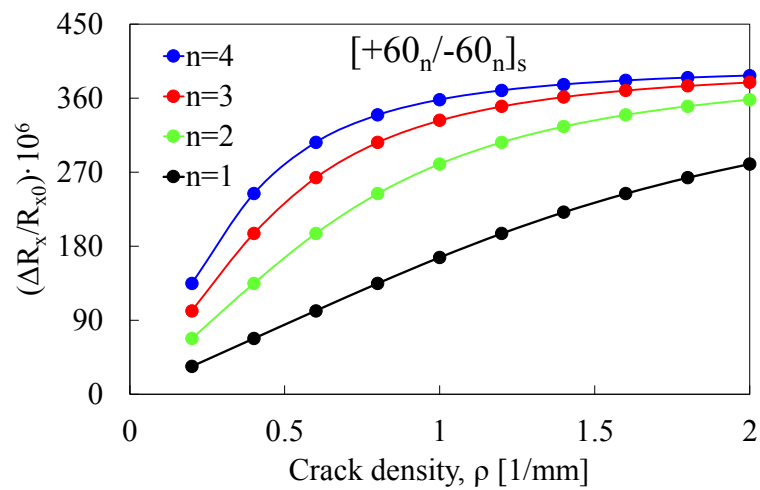


FIG.3.9 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+60_n/-60_n]_s$.

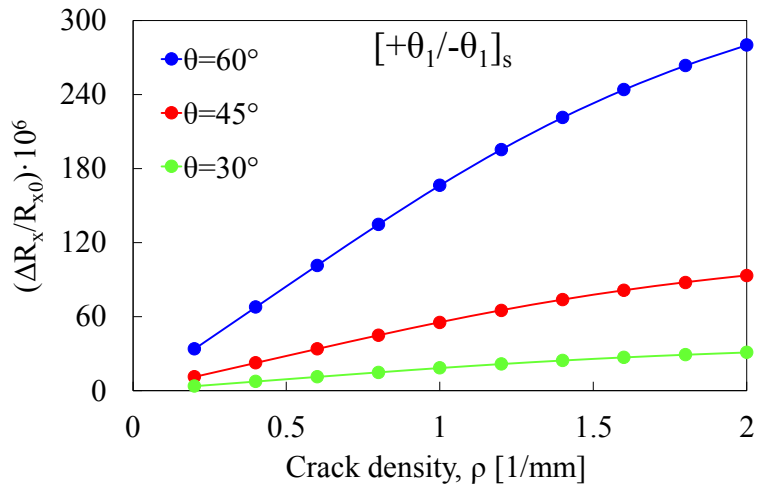


FIG.3.10 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[\theta_1/-\theta_1]_s$.

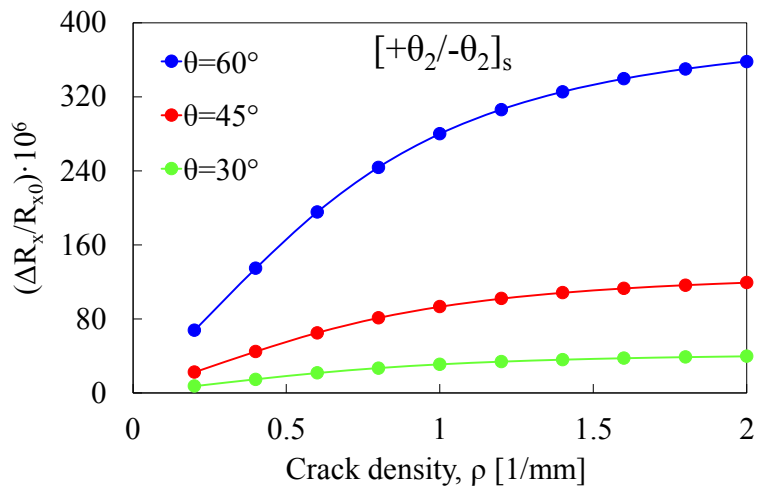


FIG.3.11 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[\theta_2/-\theta_2]_s$.

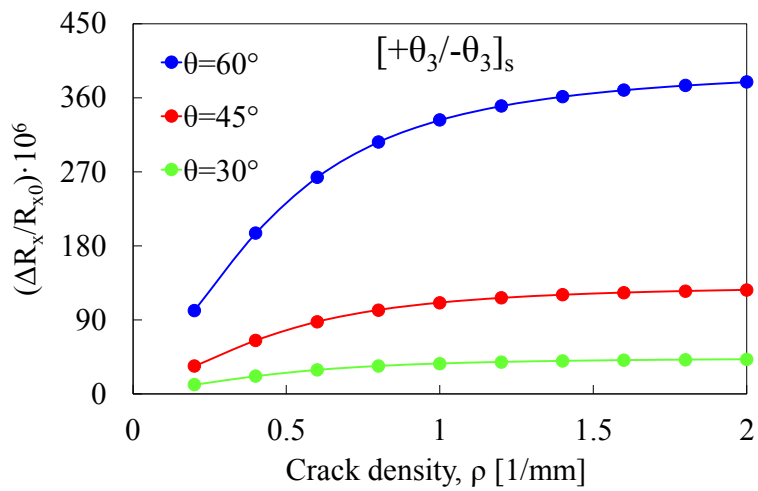


FIG.3.12 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[\theta_3/-\theta_3]_s$.

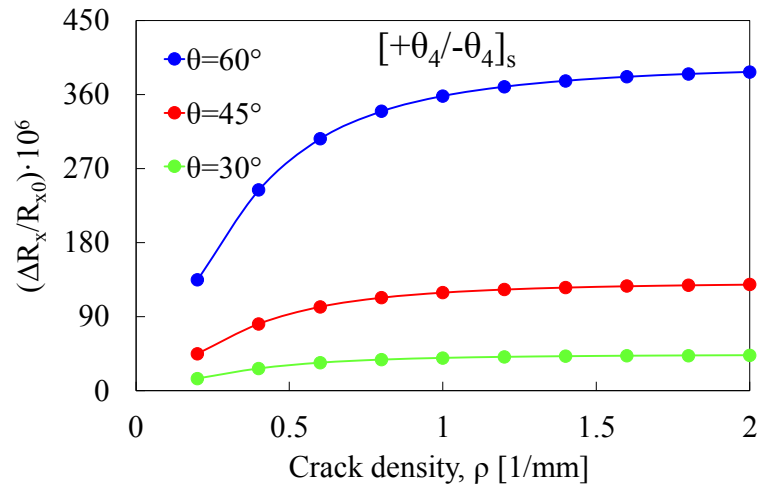


FIG.3.13 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_4/-\theta_4]_s$.

I risultati ottenuti sono insoddisfacenti poiché, seppur i trend di ogni serie siano nelle aspettative, gli incrementi sono insignificanti, il massimo incremento di resistenza infatti, si verifica per valori di *crack density* pari a 2 su laminati $[+60_4/-60_4]_s$ ed è pari allo 0,04%. Dal confronto tra i vari risultati precedenti, la maggiore sensibilità di un *cross-ply* rispetto a laminati $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ potrebbe essere interpretata come una maggiore ostruzione al flusso di corrente rappresentato dalle cricche a 90° , rispetto a cricche orientate a qualsiasi inclinazione diversa da 90° . Una barriera perfettamente perpendicolare ad un flusso di corrente, è sicuramente la più efficace se l'obiettivo è quello di ostruire il flusso stesso. Non bisogna comunque dimenticare che il modello implementa un solo strato criccato, nella realtà il danneggiamento, in termini di *crack density*, interesserà tutti gli strati di un laminato $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ e sarà assolutamente equiparabile per tutte le lamine. Per un *cross-ply* invece, anche nella realtà il danneggiamento interesserà i soli *ply* a 90° . Considerazioni valide ipotizzando una sollecitazione assiale lungo la direzione principale del laminato e pre delaminazioni/rottura delle fibre.

In ultima analisi si vuole cercare di capire cosa possa succedere nel caso in cui si decida di iniettare la corrente lungo una direzione diversa da quella principale, di un laminato *cross-ply* e dunque, valutare il corrispettivo incremento di resistenza lungo quella direzione. Si devono riorientare le lamine secondo un nuovo sistema di riferimento globale, che consideri come asse principale la direzione di iniezione della corrente.

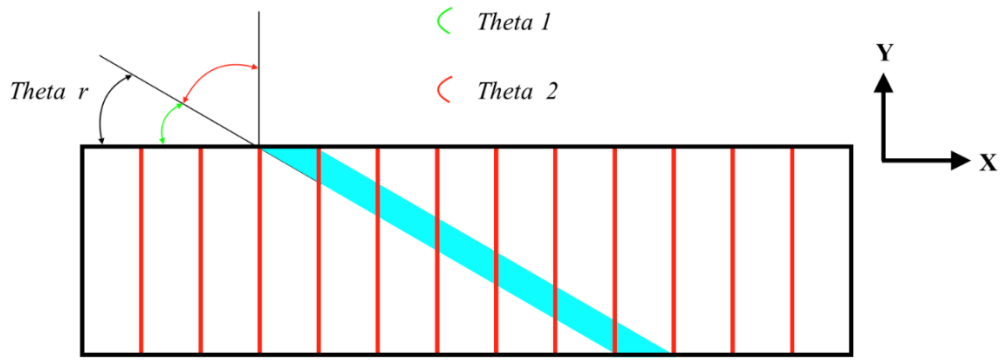


FIG.3.14 Vista sul piano XY di un laminato simmetrico $[0/90_n]_s$. Angolo di iniezione della corrente (θ_r) diverso da 0° .

Quindi, per laminati *cross-ply* devono valere le seguenti espressioni:

$$\theta'_1 = \theta_1 - \theta_r = 0^\circ - \theta_r \quad (3.1)$$

$$\theta'_2 = \theta_2 - \theta_r = 90^\circ - \theta_r \quad (3.2)$$

Ipotizzando come angoli di iniezione della corrente, delle inclinazioni convenzionali pari a 30° , 45° e 60° , il risultato che si ottiene è il medesimo che si otterrebbe iniettando corrente lungo x e modificando il *lay-up* secondo quanto segue:

$$\theta_r = 30^\circ \rightarrow [-30/+60_n]_s \quad (3.3)$$

$$\theta_r = 45^\circ \rightarrow [-45/+45_n]_s \quad (3.4)$$

$$\theta_r = 60^\circ \rightarrow [-60/+30_n]_s \quad (3.5)$$

Si presuppone sempre un solo strato criccato relativo alle lamine $(\theta_2)_n$.

Si riportano i risultati ottenuti.

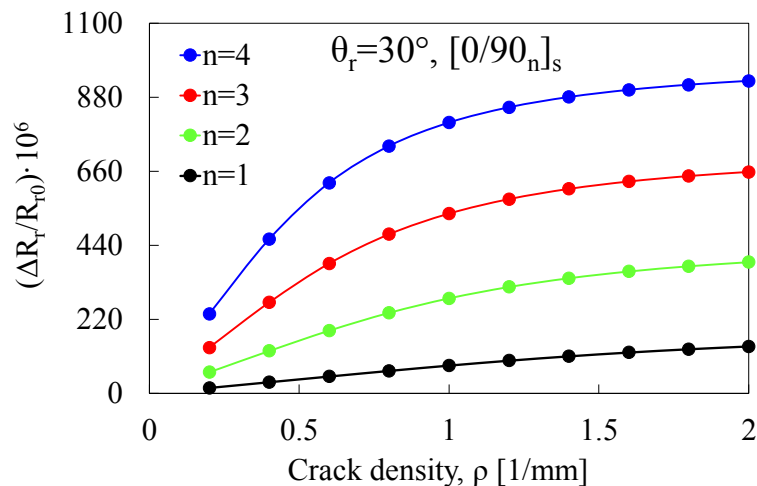


FIG.3.15 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[0/90_n]_s$. Angolo di iniezione della corrente (θ_r) pari a 30° .

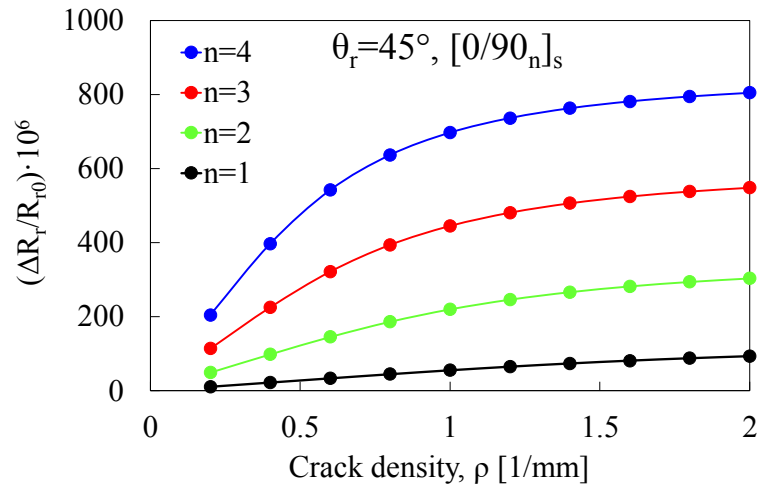


FIG.3.16 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici [0/90_n]_s. Angolo di iniezione della corrente (θ_r) pari a 45°.

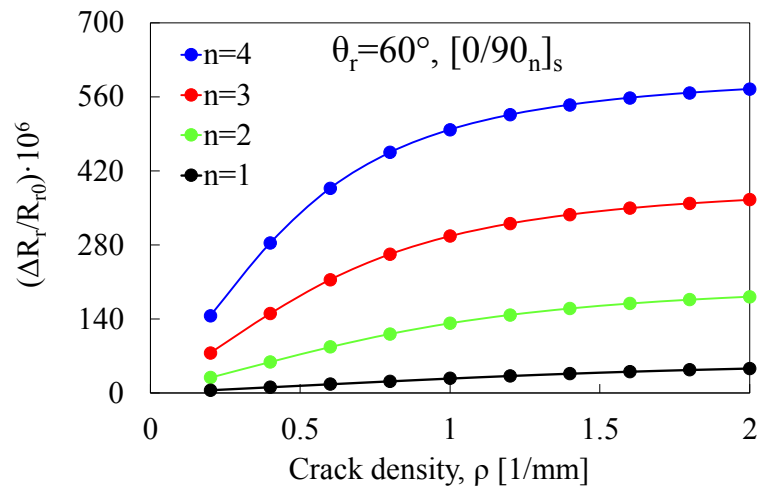


FIG.3.17 Incremento della resistenza elettrica in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici [0/90_n]_s. Angolo di iniezione della corrente (θ_r) pari a 60°.

Gli incrementi restano sempre molto bassi ma comunque conformi con i risultati relativi a *lay-up* del tipo [(+θ)_n/(-θ)_n]_s, si registrano infatti, incrementi via via maggiori iniettando corrente a 60° 45° e 30° che, secondo le equazioni 3.3, 3.4 e 3.5, equivarrebbe ad avere criccati strati rispettivamente a 30° 45° e 60° (θ'₂).

Infine, si confrontino i risultati in Figura 3.8 con quelli in Figura 3.16. Per entrambe le situazioni sono stati implementati *lay-up* con angoli di orientazione delle singole lamine pari a ± 45°. Nel secondo caso, incrementando il numero di lamine del solo strato criccato, si ha una sensibilità notevolmente maggiore e soprattutto proporzionale (0,08 % di incremento massimo) rispetto al primo caso, in cui si incrementa il numero di lamine sia dello strato danneggiato, sia dello strato non danneggiato, per un incremento massimo della resistenza elettrica pari a 0,013 %.

3.4 Referenze

- [1] Francesco Panozzo, Michele Zappalorto, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical resistance change vs damage state in cracked symmetric laminates: A closed form solution*, Composite Structures, 184, 2018, p.1081-1091.
- [2] Paolo Andrea Carraro, Michele Zappalorto, Marino Quaresimin, *Health Monitoring of cross-ply laminates: Modelling the correlation between damage evolution and electrical resistance change*, Composite: Part A, 82, 2016, p.151-158.
- [3] Michele Zappalorto, Francesco Panozzo, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments*, Composite Science and Technology, 143, 2017, p.31-45.

MODELLO NUMERICO CON RVE

4.1 Introduzione

Adottando un approccio simile all'analisi agli elementi finiti, relativa al modello analitico [1], si modella, tramite un codice di calcolo *FEM*, un *RVE* (*Rappresentative Volume Element*), con la differenza, che si considerano danneggiati entrambi gli strati del laminato. L'*RVE* sarà dunque un volume rappresentativo compreso tra quattro cricche, appartenenti due alla lamina uno e due alla lamina due.

4.2 Modellazione

La situazione all'interfaccia sarà un *pattern* di cricche orientate secondo la direzione principale delle rispettive lamine e distanziate in funzione di un determinato *crack spacing*. Per rendere più visibile la rappresentazione geometrica, si utilizza il verde per la lamina uno e il rosso per la lamina due.

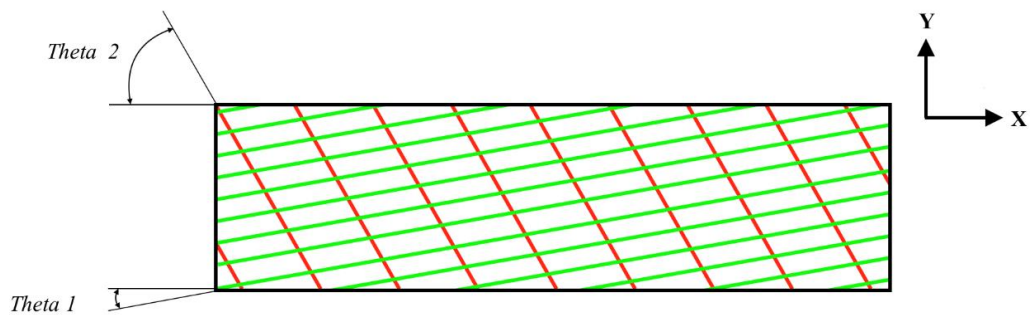


FIG.4.1 *Pattern* di cricche all'interfaccia tra la prima e la seconda lamina.

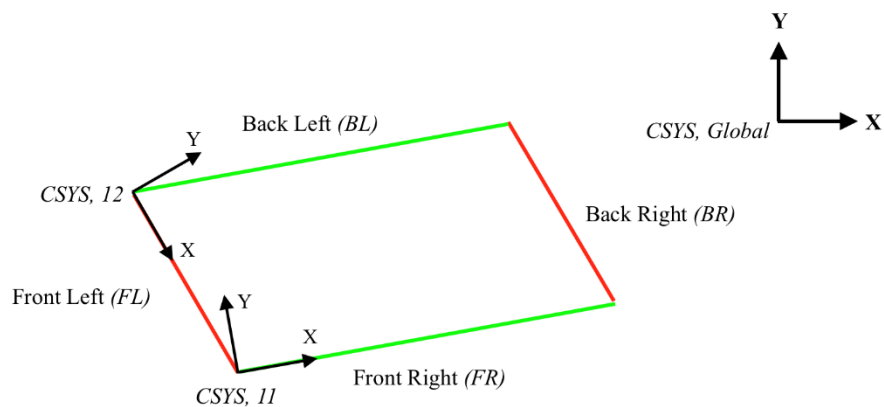


FIG.4.2 Vista sul piano XY dell'*RVE*, sistemi di coordinate locali e nomenclature.

Ciascuna lamina avrà il proprio sistema di riferimento orientato secondo la direzione delle fibre, rispettivamente:

- CSYS, 11 sistema di riferimento della lamina uno;
- CSYS, 12 sistema di riferimento della lamina due.

Si associa inoltre ad ogni faccia dell'*RVE* un'opportuna nomenclatura che sarà necessaria successivamente per imporre le *Constrain Equation* relative alla periodicità delle condizioni al contorno. Anche in questo caso, trattandosi di laminati simmetrici, l'analisi si circoscrive alla sola parte simmetrica superiore del laminato.

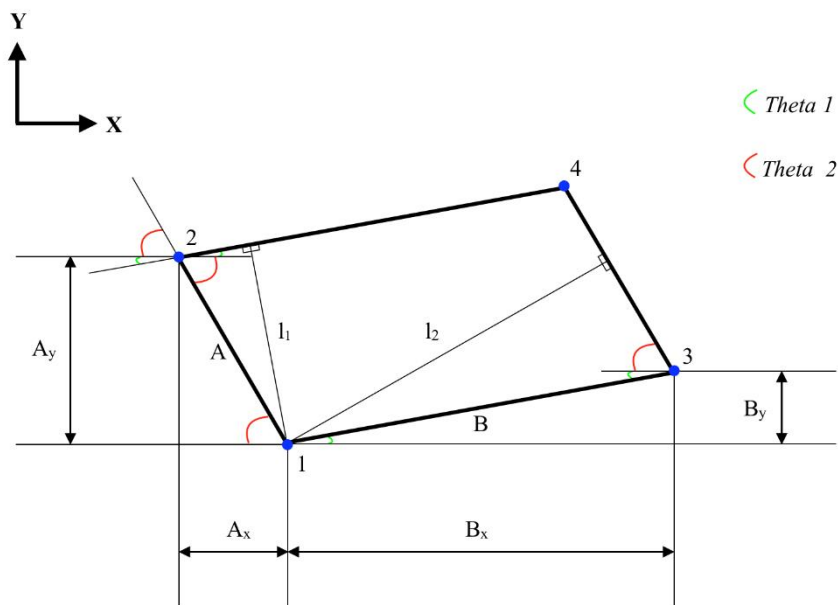


FIG.4.3 Dimensioni geometriche dell'*RVE* per angoli $(\theta_1 + \theta_2) < 90^\circ$.

Indicando con l_1 crack spacing della lamina uno e con l_2 crack spacing della lamina due, si procede con il calcolo delle seguenti quote geometriche.

$$A = l_1 / \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad \rightarrow \quad A_x = A * \cos(\theta_2) \quad \text{e} \quad A_y = A * \sin(\theta_2) \quad (4.1)$$

$$B = l_2 / \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad \rightarrow \quad B_x = B * \cos(\theta_1) \quad \text{e} \quad B_y = B * \sin(\theta_1) \quad (4.2)$$

Poiché si sta analizzando un *lay-up* generico ma differente rispetto ad un *cross-ply* (se avessimo una lamina con le fibre a 0° la modellazione non avrebbe senso poiché verrebbero ricreate delle cricche a 0°) si presuppone che le seguenti ipotesi siano sempre verificate:

$$\theta_1 \in]0^\circ; 90^\circ[\quad , \quad \theta_2 \in]0^\circ; 90^\circ[\quad \rightarrow \quad (\theta_1 + \theta_2) \in]0^\circ; 180^\circ[$$

Pertanto, le quote geometriche precedentemente calcolate risultano valide anche nel caso in cui $(\theta_1 + \theta_2) = \gamma > 90^\circ$ poiché il $\sin(180 - \gamma) = \sin(\gamma)$.

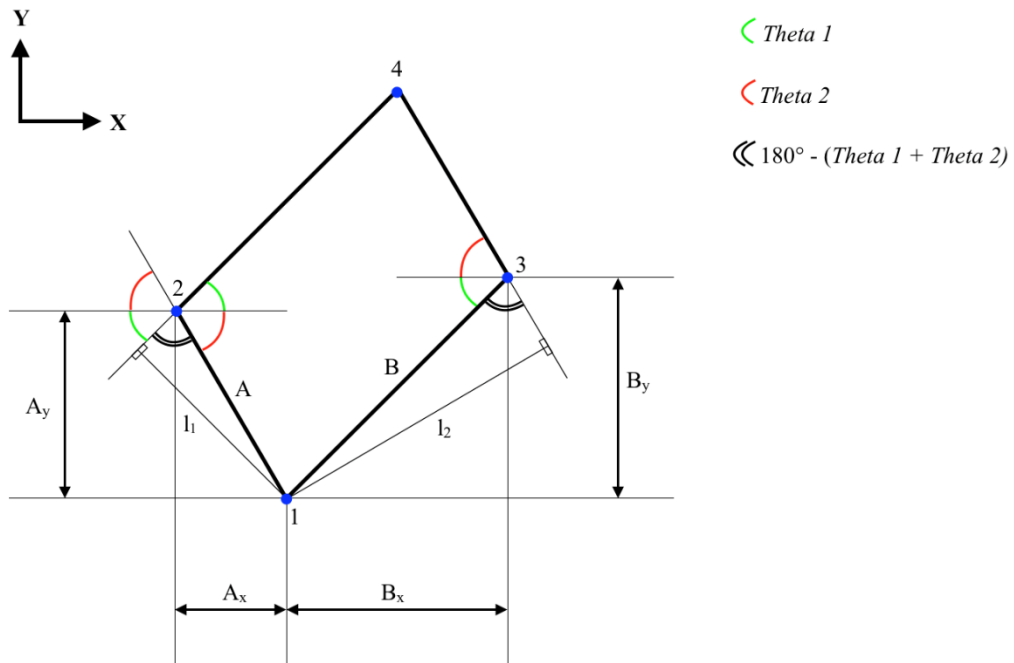


FIG.4.4 Dimensioni geometriche dell'RVE per angoli $(\theta_1 + \theta_2) > 90^\circ$.

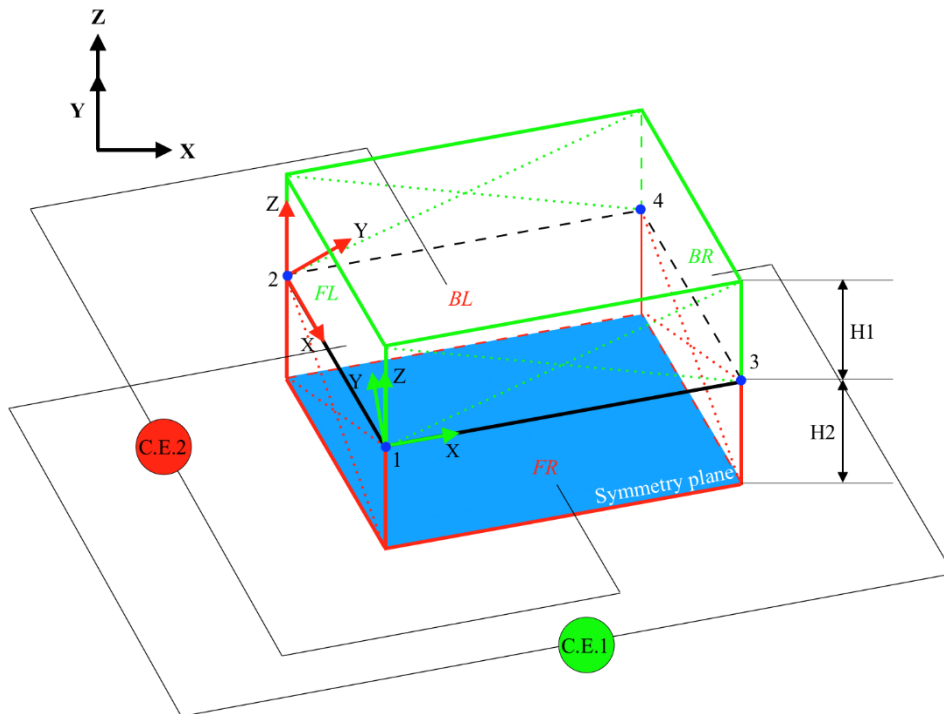


FIG.4.5 Condizioni al contorno imposte sull'RVE.

Il primo obiettivo di tale modellazione sarà quello di calcolarsi la resistenza elettrica lungo x a seguito di un potenziale imposto lungo la direzione del laminato. Si presuppone dunque di imporre un campo elettrico unitario e_x ma non si può fare nessuna assunzione per e_y che sarà sicuramente presente a livello locale a causa del comportamento elettrico ortotropo delle lamine.

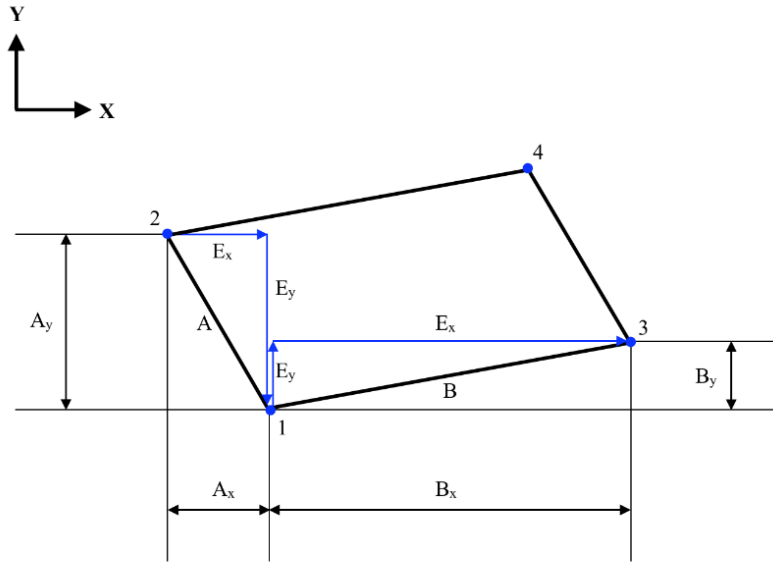


FIG.4.6 Campi elettrici vettoriali relativi ai nodi 1,2 e 3, lungo le due direzioni principali X e Y.

Pertanto, nell'imporre le condizioni al contorno, si deve esprimere il tutto in funzione di e_x svincolandosi dalla componente lungo y del campo elettrico.

Noto che $\Delta V = \Delta E * \Delta S$ e supponendo le quote geometriche $a_x, a_y, b_x, b_y > 0$, si definiscono le condizioni al contorno secondo quanto segue.

Constrain Equation

Si impone: $V(1) = 0V$;

$$\text{C.E. 1. } V_{BR} - V_{FL} = V_3 - V_1 = V_3 \quad (4.3)$$

$$\text{C.E. 2. } V_{FR} - V_{BL} = V_1 - V_2 = -V_2 \quad (4.4)$$

Si esprime la variazione di potenziale dei nodi sopra citati, considerando i corrispettivi contributi vettoriali del campo elettrico.

$$V_1 - V_2 = (E_x * A_x - E_y * A_y) = -V_2 \quad (4.5)$$

$$V_3 - V_1 = (E_x * B_x + E_y * B_y) = V_3 \quad (4.6)$$

Manipolando le equazioni 4.5 e 4.6 si ottiene quando segue:

$$(4.5) \rightarrow E_y = \frac{(E_x * A_x + V_2)}{A_y} \quad \text{sostit. (4.6)} \rightarrow V_3 = E_x * B_x + \frac{(E_x * A_x + V_2)}{A_y} * B_y$$

$$(4.6) \rightarrow E_y = \frac{(V_3 - E_x * B_x)}{B_y} \quad \text{sost. (4.5)} \rightarrow -V_2 = E_x * A_x - \frac{(V_3 - E_x * B_x)}{B_y} * A_y$$

$$C.E.1. \quad 1 * V_{BR} - 1 * V_{FL} - \frac{B_y}{A_y} * V_2 = \left(B_x + B_y * \frac{A_x}{A_y} \right) * E_x \quad (4.7)$$

$$C.E.2. \quad 1 * V_{FR} - 1 * V_{BL} + \frac{A_y}{B_y} * V_3 = \left(A_x + A_y * \frac{B_x}{B_y} \right) * E_x \quad (4.8)$$

Tuttavia, non essendoci coppie di lati opposti orientati secondo la direzione principale del laminato risulta difficile l'implementazione del calcolo della resistenza elettrica lungo x.

Si preferisce dunque ragionare in termini di resistività elettrica lungo x.

In particolare, si calcola dapprima il valore della densità di corrente lungo x mediata nel volume dell'*RVE*. Viene implementata in Ansys una *Element Table* che discretizzi l'integrale secondo quanto segue:

$$\bar{J}_x = \frac{1}{V} \cdot \int_V J_x \cdot dV \rightarrow \frac{1}{V} \cdot \sum_{i=1}^N j_{xi} \cdot V_i \quad (4.9)$$

$$\bar{\eta}_x = \frac{E_x}{\bar{J}_x} \quad (4.10)$$

Con j_{xi} e V_i , si indicano rispettivamente densità di corrente e volume dell'elemento *i*-esimo *meshato* su Ansys, per discretizzare il volume dell'*RVE*.

Si verifica inoltre, che la densità di corrente lungo y sia complessivamente nulla. La densità di corrente lungo x invece, è uniformemente distribuita lungo tutto lo spessore, vi è una lieve concentrazione all'interfaccia ma l'ordine di grandezza è il medesimo. A titolo di esempio si riportano dei risultati di Ansys ottenuti con *crack density* pari ad 1 [1/mm] per un *lay-up* [+30/-30]_s.

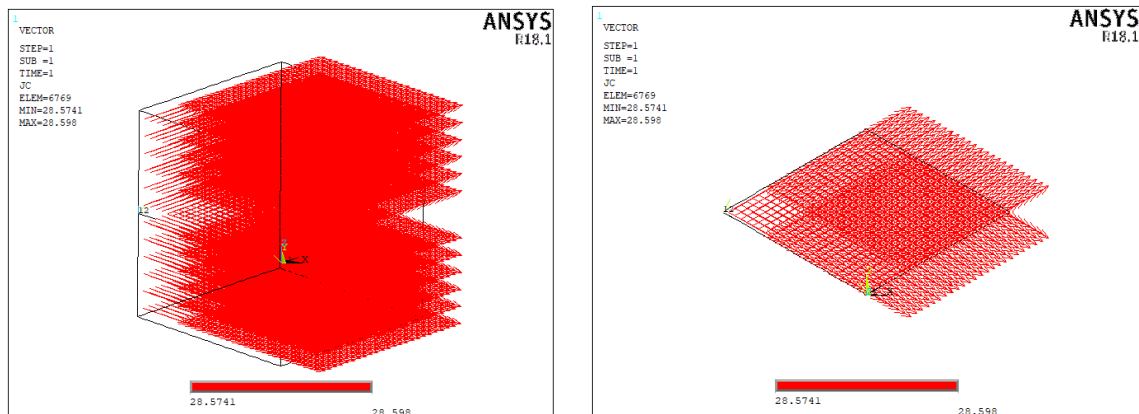


FIG.4.7-4.8 Densità di corrente (*JC*).

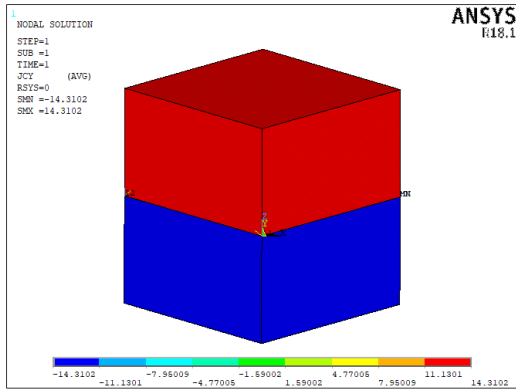


FIG.4.9 Densità di corrente lungo l'asse Y (J_{CY}).

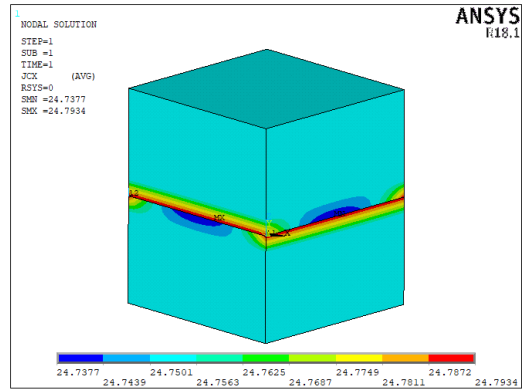


FIG.4.10 Densità di corrente lungo l'asse X (J_{CX}).

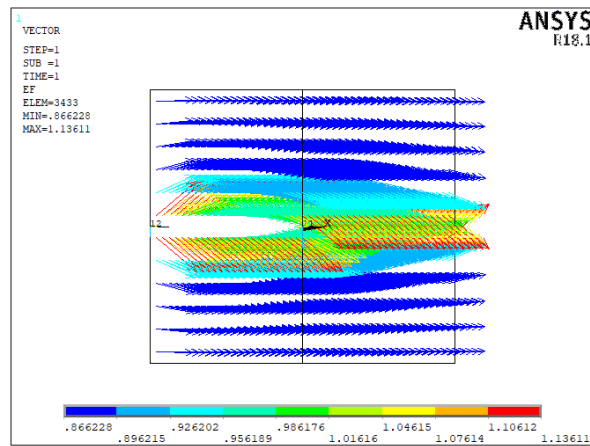


FIG.4.11 Campo elettrico (EF).

Per il calcolo della resistività lungo x, nel caso in cui l' RVE non sia danneggiato, si modifica il modello precedente mantenendo le medesime *Constrain Equation* ma inglobando nelle facce, anche le corrispettive precedentemente criccate. Per cui resta valida la rappresentazione in Figura 4.12, ma l'implementazione di FL-BR e FR-BL interesserà tutto lo spessore dell' RVE da $-h_2$ a $+h_1$.

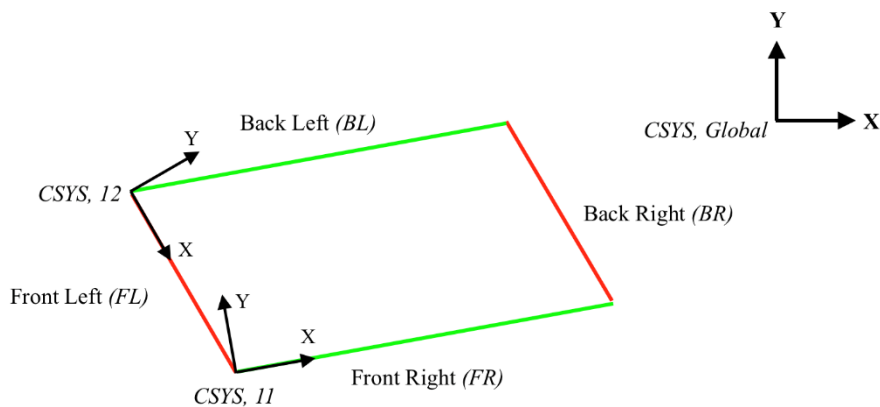


FIG.4.12 Vista sul piano XY dell' RVE , sistemi di coordinate locali e nomenclature.

Per monitorare in maniera progressiva il danneggiamento, si impostano dei cicli che vadano di volta in volta a variare il valore della densità di cricche da un minimo di 0,2 [cricche/mm] ad un massimo di 2 [cricche/mm] ad intervalli di 0,2, per un totale dunque di 10 cicli per ogni *lay-up* analizzato.

Dunque, come prima analisi, si cicla il modello non criccato per una geometria che varia in funzione della densità di cricche, implementando però delle condizioni al contorno di periodicità che non prevedano danneggiamenti, e si verifica che la resistività non subisca variazioni. Non solo la resistività resta invariata per tutti e 10 i cicli, ma risulta identica al valore calcolato con Matlab a seguito dell'implementazione della *CLT* Elettrica, descritta nel Capitolo 2. Si inserisce pertanto il valore η_{x0} direttamente nell' *APDL* del modello danneggiato, per ottenere subito i risultati $\bar{\eta}_x/\eta_{x0}$.

Si eseguono tutte le analisi per i *lay-up* analizzati nel modello analitico, relativi ad angoli di orientazione delle fibre pari a $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ e $\pm 60^\circ$. Dunque, si testano laminati del tipo $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ con valori di teta pari a 30° , 45° e 60° e n pari a 1, 2, 3 e 4. Si impostano spessori delle singole lamine pari a 0,3 mm.

Le proprietà elettriche del materiale sono sempre inerenti a laminati in fibra di carbonio con matrice epossidica dopata per mezzo di nanotubi di carbonio, i cui valori di resistività nel sistema di riferimento delle singole lamine sono riportati di seguito [2]:

$$\eta_{11} = 0,0303 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{22} = \eta_{33} = 114 [\Omega \cdot mm]$$

Nel paragrafo successivo si riportano i risultati ottenuti.

4.3 Risultati

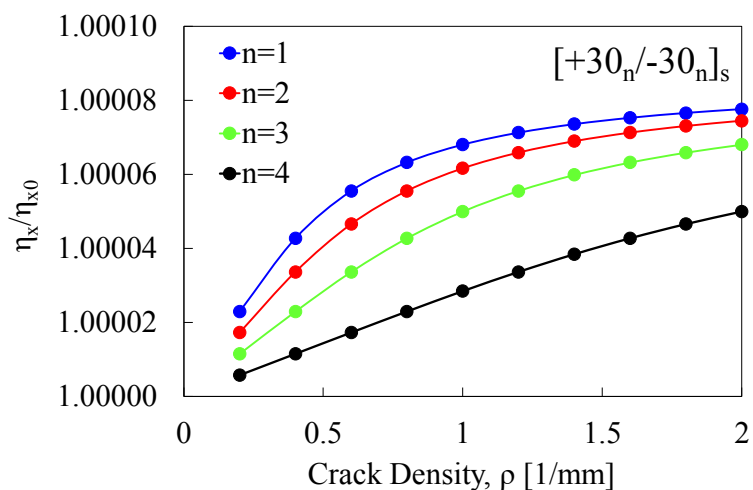


FIG.4.13 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+30_n/-30_n]_s$.

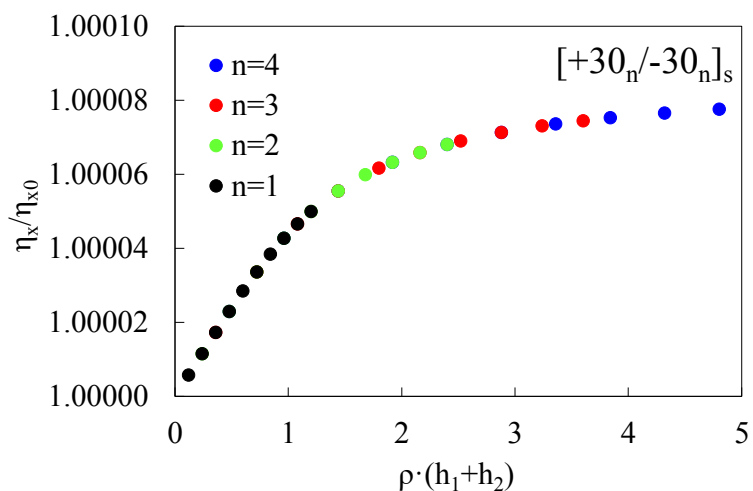


FIG.4.14 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche moltiplicata per gli spessori degli strati danneggiati, per laminati simmetrici $[+30_n/-30_n]_s$.

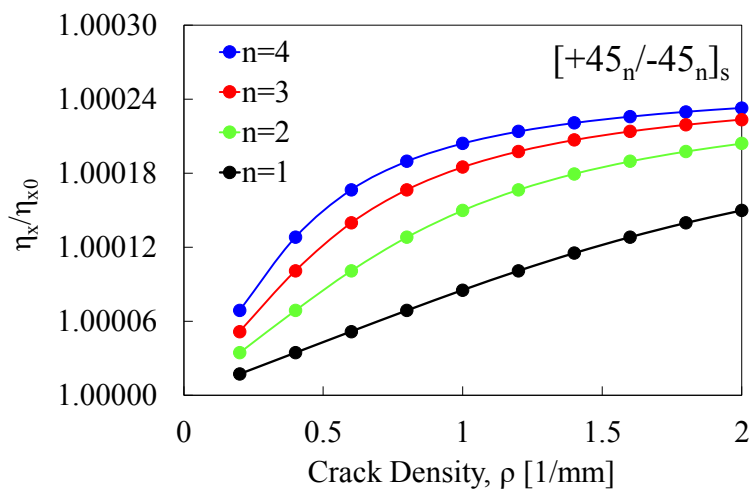


FIG.4.15 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+45_n/-45_n]_s$.

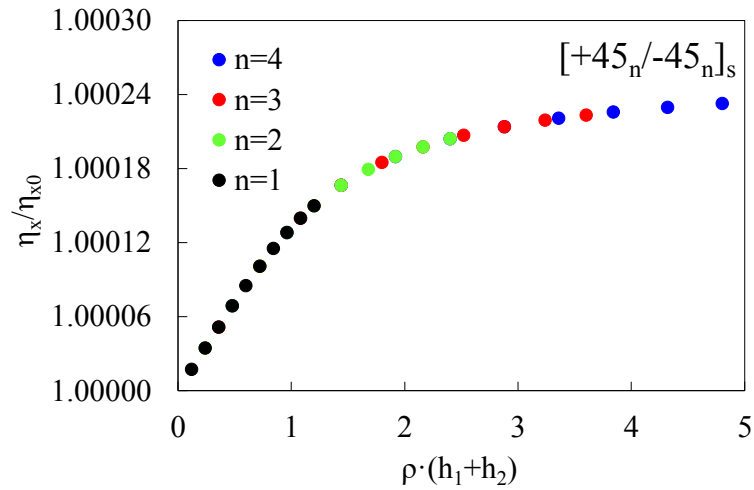


FIG.4.16 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche moltiplicata per gli spessori degli strati danneggiati, per laminati simmetrici $[+45_n/-45_n]_s$.

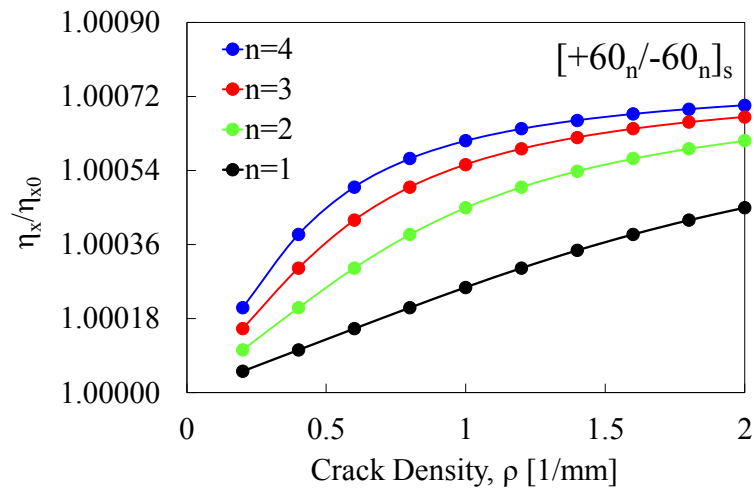


FIG.4.17 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+60_n/-60_n]_s$.

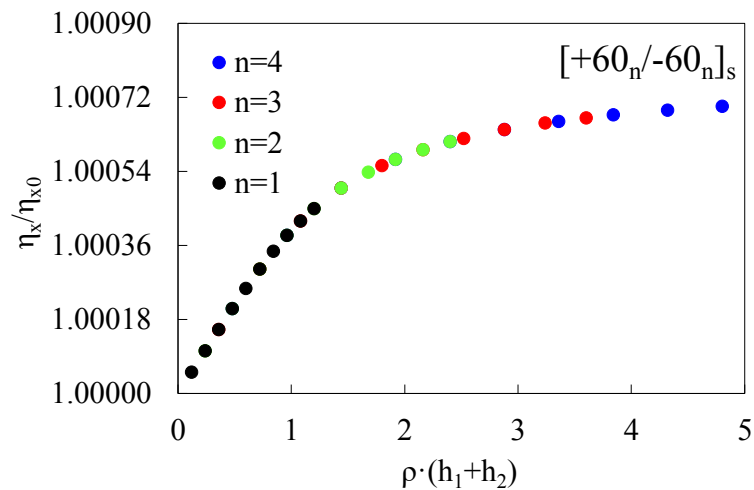


FIG.4.18 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche moltiplicata per gli spessori degli strati danneggiati, per laminati simmetrici $[+60_n/-60_n]_s$.

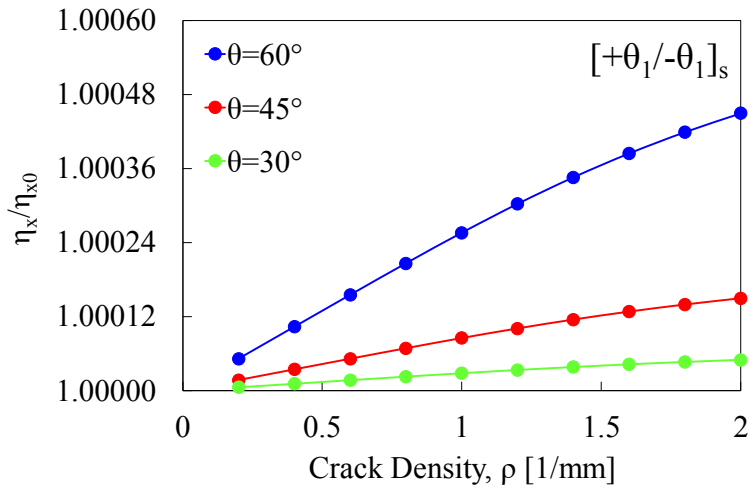


FIG.4.19 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_1/-\theta_1]_s$.

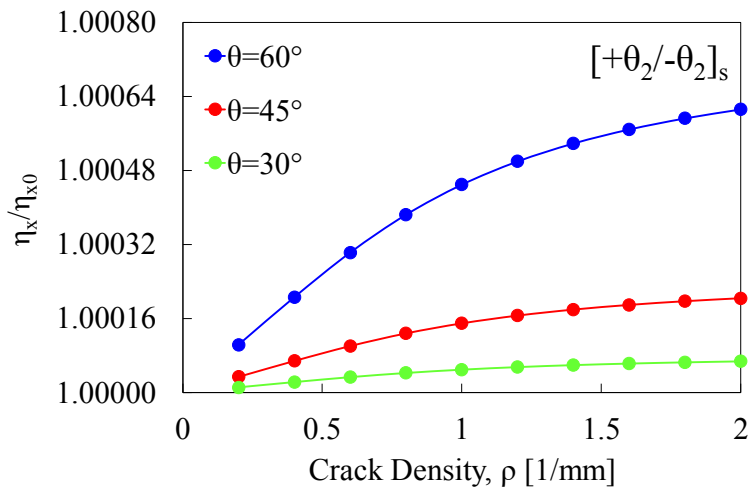


FIG.4.20 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_2/-\theta_2]_s$.

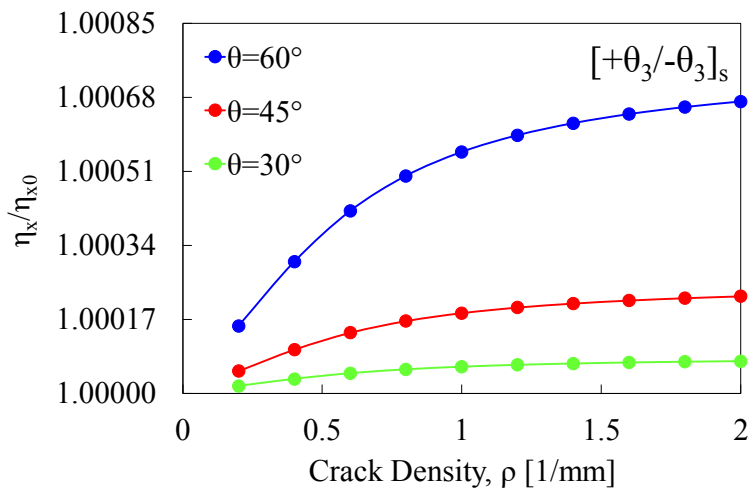


FIG.4.21 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_3/-\theta_3]_s$.

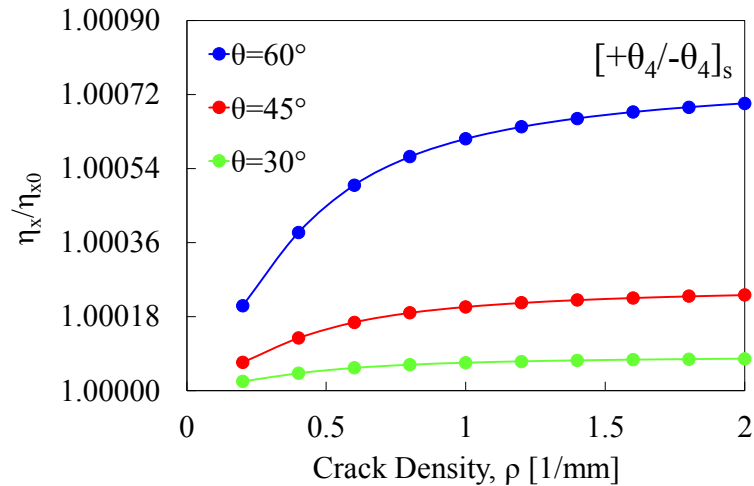


FIG.4.22 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_4/-\theta_4]_s$.

4.4 Commenti

Come si può osservare i trend sono conformi alle aspettative, per di più se si descrivono graficamente i rapporti di resistività in funzione della densità di cricche moltiplicata per gli spessori dei *ply* criccati (entrambi), le curve dei vari *lay-up*, a parità di angoli, si sovrappongono. Si vedano Figure 4.14, 4.16 e 4.18.

Come per il modello analitico, dove però si prevedeva un solo strato criccato, la configurazione più sensibile è $[+60_n/-60_n]_s$, per la quale l'incremento massimo in termini di resistività elettrica è pari allo 0,07 % per *lay-up* $[+60_4/-60_4]_s$.

Inoltre, rispetto allo 0,039 %, trovato nel capitolo precedente per mezzo di un codice di manipolazione matematica, per un laminato $[+60_4/-60_4]_s$ con un solo strato criccato, 0,07 % risulta essere poco meno del doppio, risultato sensato avendo ora entrambi gli strati criccati. Si sottolinea che i due incrementi si riferiscono a valori di resistenza, per il modello analitico, e resistività, per il modello in esame; ma a parità di sollecitazioni elettriche e geometrie, in condizioni di riposo, un incremento di resistenza elettrica sarà associato ad un incremento di pari entità della resistività elettrica, a causa di un danneggiamento permanente. Pertanto, il confronto resistenza-resistività è assolutamente lecito.

4.5 Referenze

- [1] Francesco Panozzo, Michele Zappalorto, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical resistance change vs damage state in cracked symmetric laminates: A closed form solution*, Composite Structures, 184, 2018, p.1081-1091.
- [2] Michele Zappalorto, Francesco Panozzo, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments*, Composite Science and Technology, 143, 2017, p.31-45.

ANALISI NUMERICA SU PROVINO INTERO CON UNO STRATO CRICCATO

5.1 Introduzione

In questo capitolo vengono descritti i risultati di una serie di simulazioni numeriche ottenute con una modellazione parametrica *FEM* di un provino fisico tramite *APDL*. Il laminato simmetrico rappresentato nella sola metà superiore deve presentare un solo strato criccato poiché si vuole effettuare un paragone diretto con i risultati del modello analitico.

Le proprietà elettriche del materiale sono sempre inerenti a laminati in fibra di carbonio con matrice dopata i cui valori di resistività nel sistema di riferimento delle singole lamine sono riportati di seguito [1]:

$$\eta_{11} = 0,0303 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{22} = \eta_{33} = 114 [\Omega \cdot mm]$$

5.2 Modellazione

Per prima cosa, si ricrea la geometria relativa al piano laterale del laminato facendo opportunamente attenzione nel modellare delle doppie linee in corrispondenza della presenza delle cricche, che vengono successivamente rappresentate separate per meglio comprendere il modello.

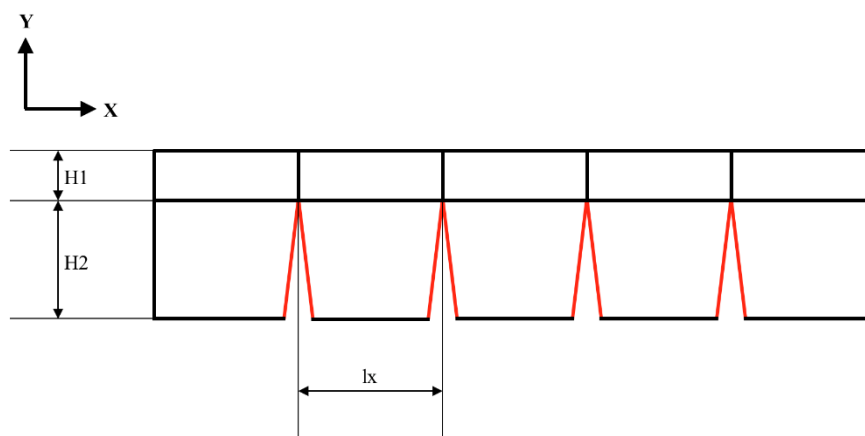


FIG.5.1 Vista sul piano XY della metà superiore del laminato.

L'idea è quella di estrarre l'intera geometria direttamente lungo la direzione delle fibre della seconda lamina che risulta essere quella danneggiata.

Ciascuna lamina avrà il proprio sistema di riferimento orientato secondo la direzione delle fibre, rispettivamente:

- CSYS, 11 sistema di riferimento della lamina uno;
- CSYS, 12 sistema di riferimento della lamina due.

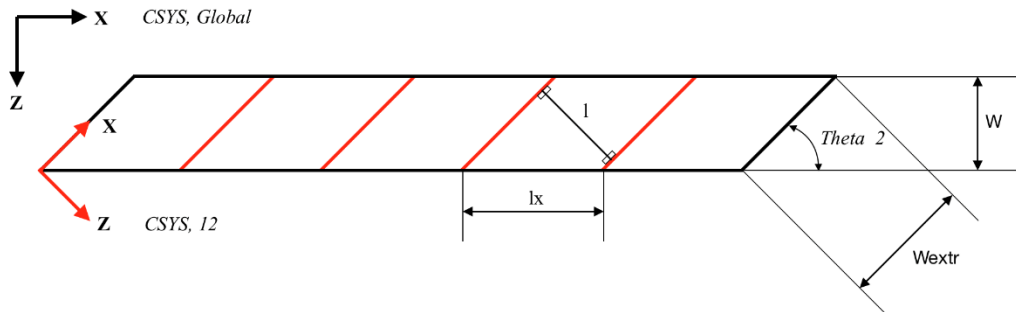


FIG.5.2 Vista sul piano XY della metà superiore del laminato, dimensioni geometriche e sistemi di coordinate.

Volendo garantire una larghezza parametrica del laminato, la direzione di estrusione viene espressa in funzione di quest'ultima: $W_{extr} = \frac{W}{\sin(\theta_2)}$

Inoltre, si impone un numero di cricche superiore a tre equidistanti rispetto x di una quota pari a $l_x = \frac{l}{\sin(\theta_2)}$ dove $l = \frac{1}{\rho}$, per cui in funzione dei vari parametri di input, la lunghezza complessiva del laminato sarà pari a $L = l_x \cdot (n_{cricche} + 1)$.

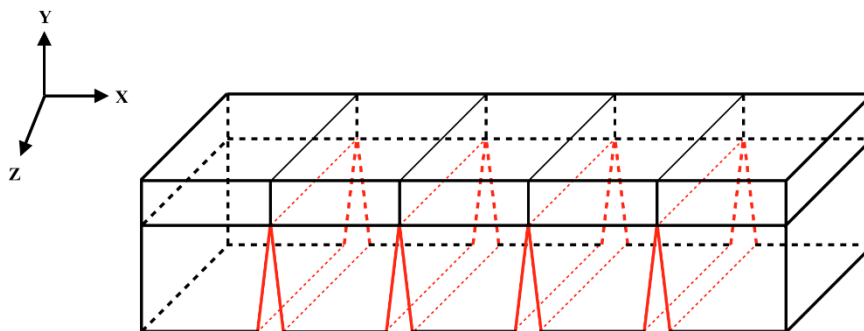


FIG.5.3 Rappresentazione tridimensionale della metà superiore del laminato.

Escludendo un *cross-ply*, si nota subito come il solido ottenuto non sia un parallelepipedo retto, il che rappresenterebbe un problema nell'imporre le condizioni al contorno poiché non è possibile imporre un potenziale lungo una direzione ma lo si può imporre ad una superficie rispetto alla quale la corrente di ingresso ha una direzione perpendicolare.

Quindi per valori di θ_2 diversi da 90° , si devono modellare due volumi esterni aggiuntivi per rendere retto il parallelepipedo ed ottenere una corrente in ingresso e uscita perfettamente orientata lungo x. Così facendo però il valore di *crack density* imposto sarà inferiore poiché creando i volumi, le facce adiacenti al solido precedentemente estruso saranno coincidenti e non separate, non riuscendo dunque a modellare delle cricche nelle aree adiacenti.

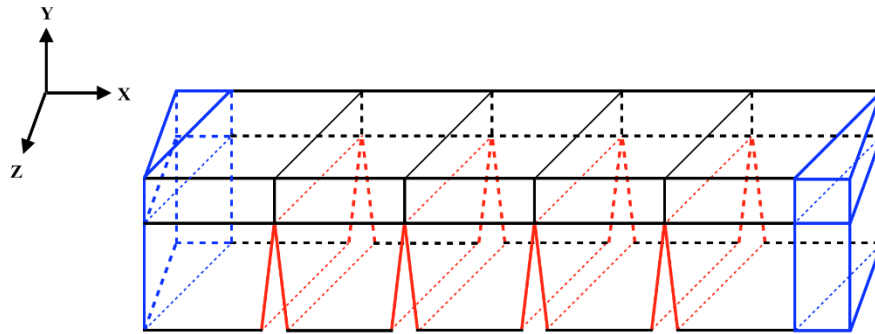


FIG.5.4 Rappresentazione tridimensionale della metà superiore del laminato e dei volumi esterni aggiuntivi.

La geometria finale è quella rappresentata in Figura 5.4.

Una volta orientati gli elementi delle lamine secondo i rispettivi sistemi di riferimento locali si impongono le condizioni al contorno. Si impostano pertanto un potenziale pari ad 1 e 0 volt sulle superfici laterali del laminato nel piano YZ, garantendo quindi un $\Delta V_x = 1V$.

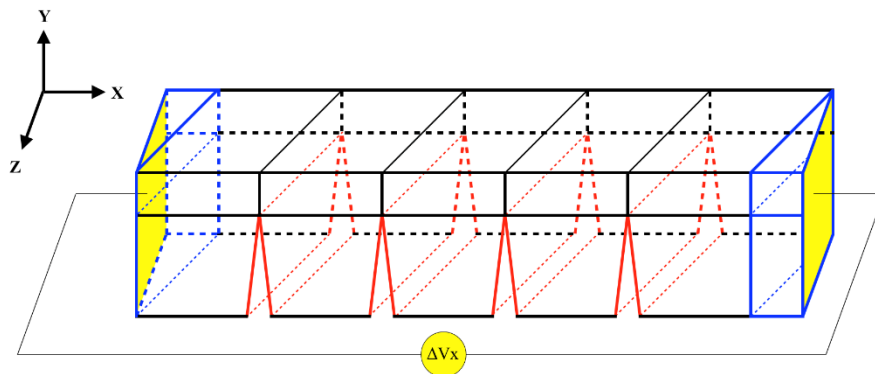


FIG.5.5 Condizioni al contorno imposte sulla metà superiore del laminato.

Volendo ragionare in termini di incremento della resistenza elettrica R_x , si deve calcolare la corrente I_x , per farlo si integra la densità di corrente elettrica J_x sulla superficie di ingresso (area gialla a sinistra in Figura.5.5).

Sapendo che:

$$I_x = \int_A j_x dA \quad (5.1)$$

e nota la d.d.p. pari a 1V, si applica la legge di Ohm per il calcolo della resistenza elettrica:

$$R_x = \Delta V_x / I_x \quad (5.2)$$

Per il non danneggiato, volendo garantire la medesima geometria, si modella un provino secondo i medesimi passaggi sopra descritti, con la differenza che, mentre prima si ricreavano delle doppie linee per realizzare le cricche, ora le linee saranno singole.

Per entrambi i casi, danneggiato e non, si impostano dei cicli che vadano di volta in volta a variare il valore della densità di cricche da un minimo di 0,2 [cricche/mm] ad un massimo di 2 [cricche/mm] ad intervalli di 0,2, per un totale dunque di 10 cicli per ogni *lay-up* analizzato.

I parametri di input tramite *APDL* sono i seguenti:

- **n**, numero di cricche;
- **ρ** , *crack density* [1/mm] → **\mathbf{l}** , *crack spacing* [mm] → **\mathbf{l}_x** , *crack spacing* lungo x [mm];
- **w**, larghezza del laminato [mm];
- **h₁**, altezza lamina 1 [mm];
- **h₂**, altezza lamina 2 [mm];
- **θ_1** , orientazione fibre lamina 1 [grad];
- **θ_2** , orientazione fibre lamina 2 [grad].

Per ogni step dei vari cicli, gli unici parametri a subire variazioni sono quelli evidenziati in rosso pertanto, imponendo un determinato numero di cricche, se la *crack density* aumenta, diminuirà di conseguenza il *crack spacing* e dunque la lunghezza complessiva del laminato. Quindi per la resistenza elettrica, in parte ci si aspetta che aumenti a seguito del danneggiamento, e in parte che diminuisca a seguito della riduzione di lunghezza, nel complesso si focalizzerà l'attenzione sul rapporto R_x/R_{x0} , piuttosto che sui singoli valori. Come per il modello analitico, si testano dunque dapprima laminati *cross-ply* del tipo $[0/90_n]_s$ e successivamente laminati del tipo $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ con valori di teta pari a 30°, 45° e 60° e n pari a 1, 2, 3 e 4. Si impostano spessori delle singole lamine pari a 0,3 mm, un numero di cricche complessive pari a 10 ed infine, una larghezza unitaria del laminato pari ad 1 mm.

5.3 Risultati

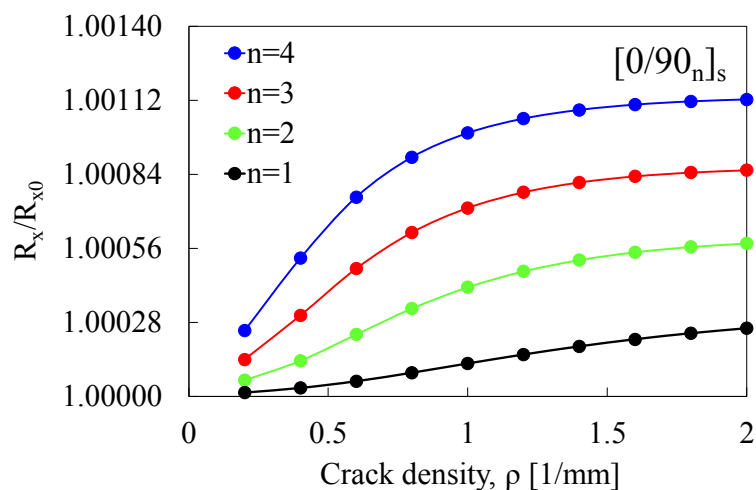


FIG.5.6 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[0/90_n]_s$.

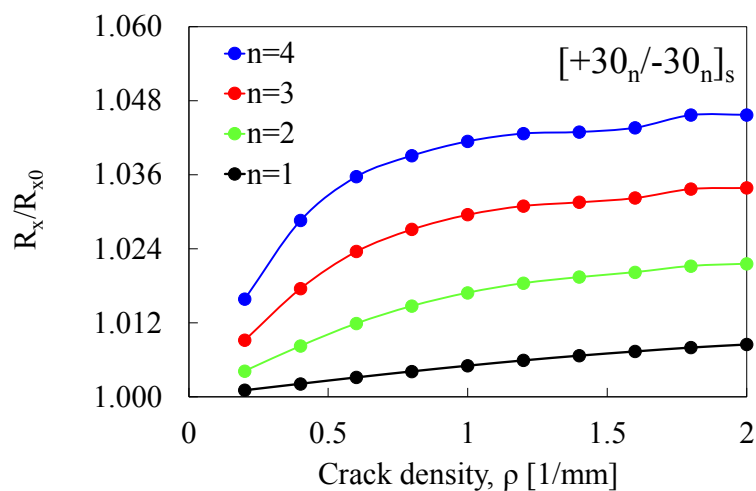


FIG.5.7 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+30_n/-30_n]_s$.

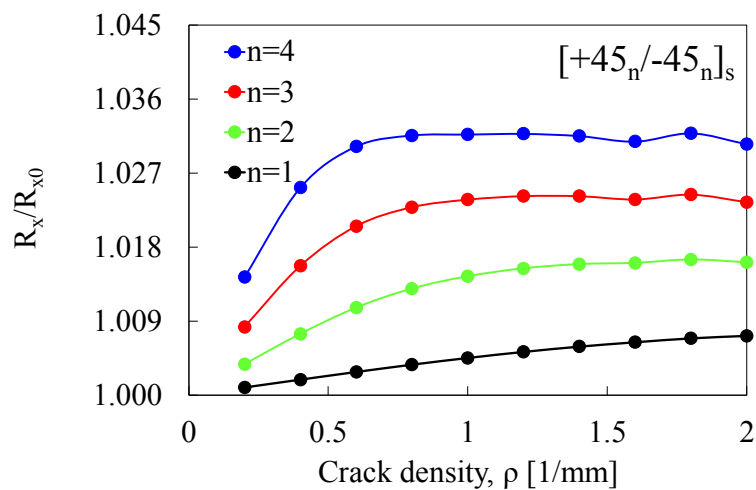


FIG.5.8 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+45_n/-45_n]_s$.

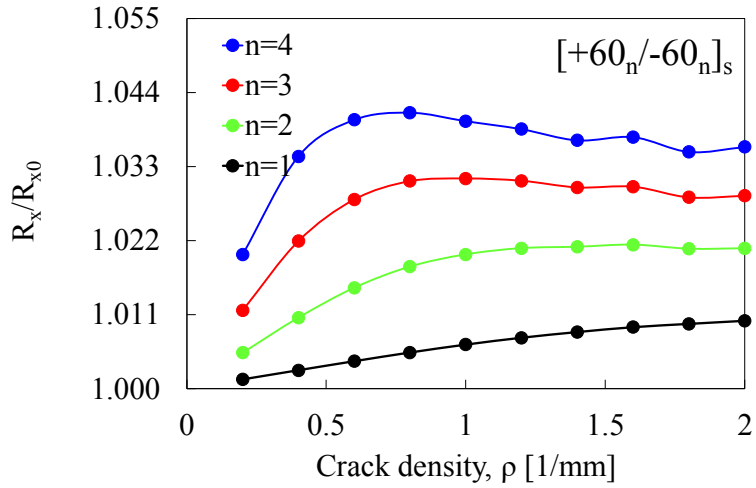


FIG.5.9 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+60_n/-60_n]_s$.

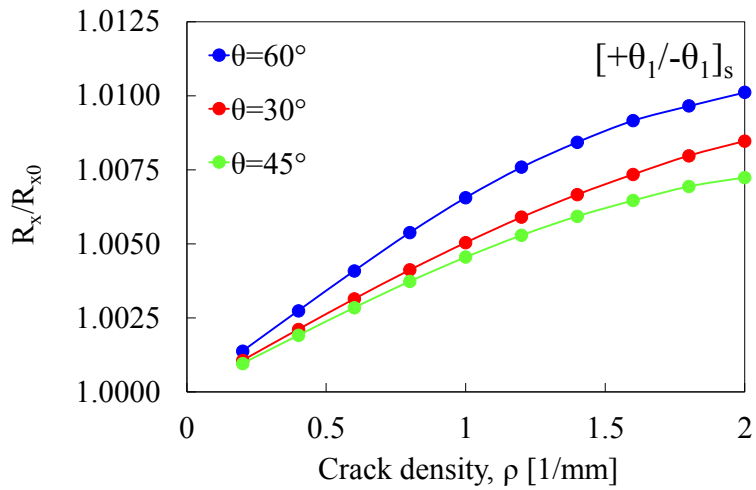


FIG.5.10 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_1/-\theta_1]_s$.

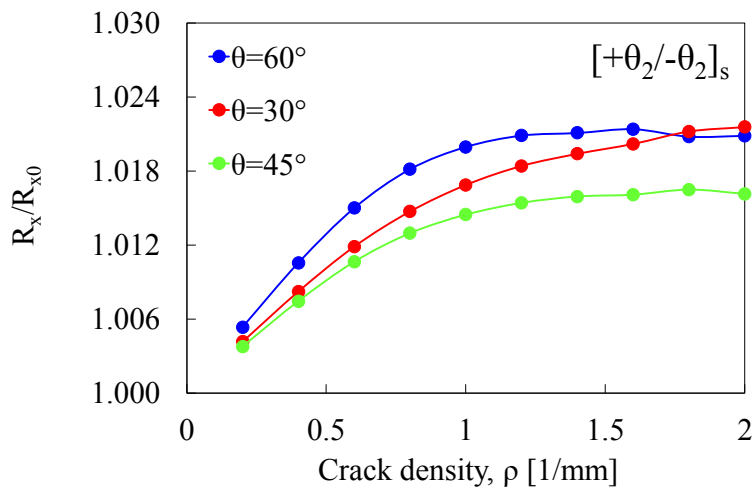


FIG.5.11 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_2/-\theta_2]_s$.

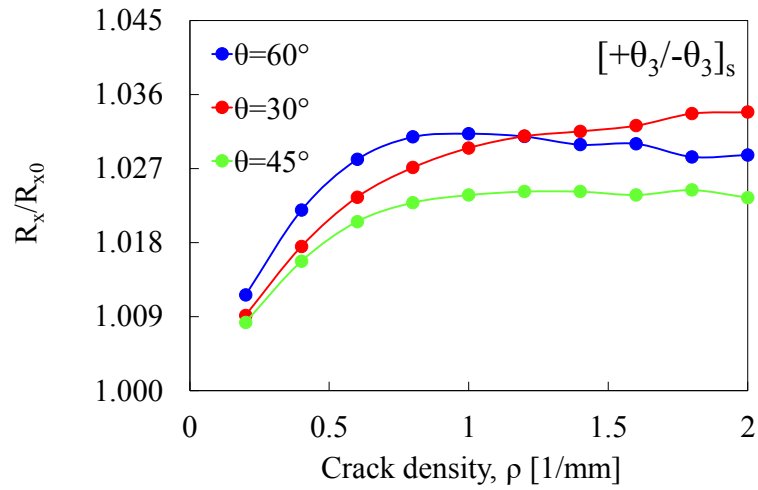


FIG.5.12 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_3/-\theta_3]_s$.

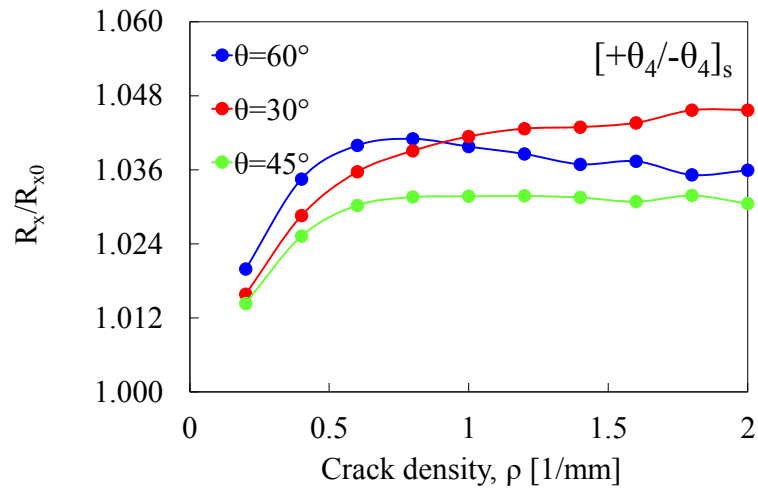


FIG.5.13 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_4/-\theta_4]_s$.

5.4 Commenti

I risultati ottenuti sono sicuramente migliori dei precedenti in termini di sensibilità, ora infatti il massimo valore raggiunto per un laminato $[+30_4/-30_4]_s$ è del 4,57 % anche se soffermandosi fino a strati con due *ply* al massimo (Figura.5.10 e Figura.5.11), dove i trend sembrano essere meno affetti da errore, i *lay-up* più sensibili sono ancora $[+60_n/-60_n]_s$.

Non si capisce però come mai i meno sensibili sembrano essere i *lay-up* $[+45_n/-45_n]_s$, ci si aspetta infatti che abbiano una sensibilità intermedia tra i $[+60_n/-60_n]_s$ e i $[+30_n/-30_n]_s$.

Molto simili invece i valori trovati per i *cross-ply*, con un valore massimo pari allo 0,112 % per una configurazione pari a $[0/90_4]_s$ contro uno 0,101 % trovato con la medesima configurazione secondo il modello analitico.

Si riportano a titolo di esempio dei risultati di ansys ottenuti con *crack density* pari ad 1 [1/mm] per un *lay-up* $[+30/-30]_s$, dove si può osservare come la corrente si distribuisca all'interfaccia tra le due lamine. A causa dell'omogeneità del materiale che si implementa su Ansys (fisicamente non si tratta di un materiale disomogeneo costituito da fibre e matrice come sarà nella realtà, ma di un materiale omogeneo con proprietà ortotrope in termini elettrici), all'interfaccia tra le due lamine si ha una direzione preferenziale per la corrente, costituita dalla sovrapposizione delle due direzioni principali delle rispettive lamine, ossia la direzione delle fibre, lungo le quali si ha la massima conducibilità elettrica e la minor resistività.

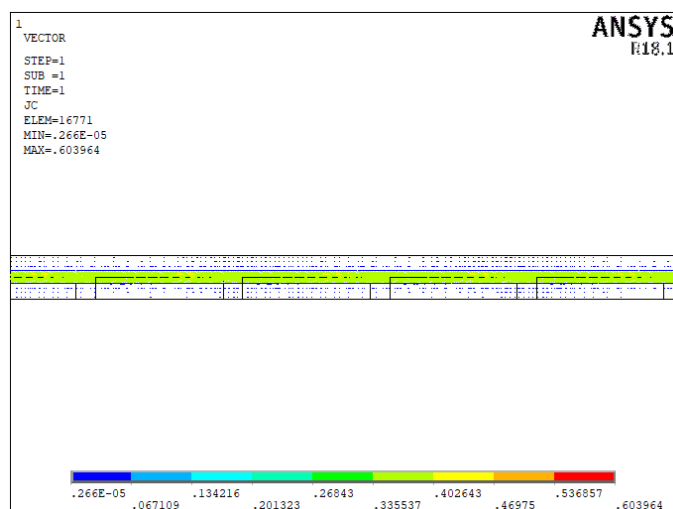


FIG.5.14 Densità di corrente (JC).

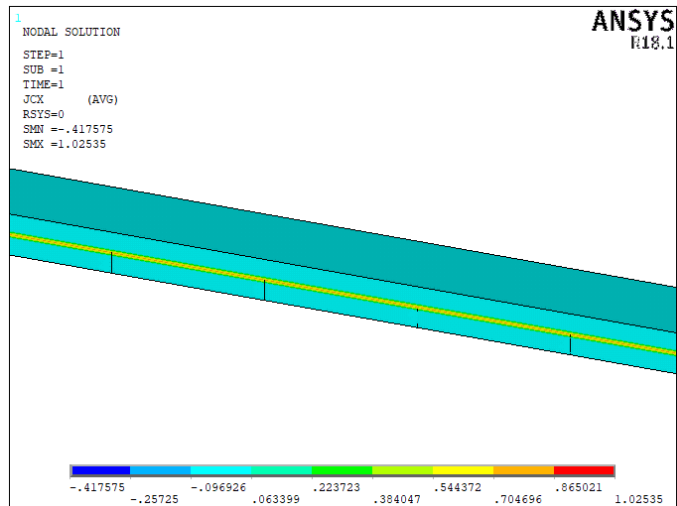


FIG.5.15 Densità di corrente lungo l'asse X (J_{CX}).

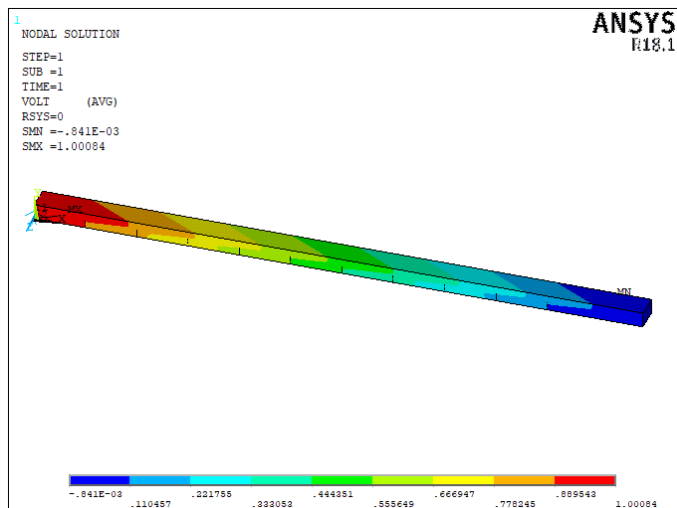


FIG.5.16 Potenziale elettrico (EV).

5.5 Referenze

- [1] Michele Zappalorto, Francesco Panozzo, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments*, Composite Science and Technology, 143, 2017, p.31-45.

ANALISI NUMERICA SU PROVINO INTERO CON DUE STRATI CRICCATI

6.1 Introduzione

Volendosi avvicinare il più possibile alla realtà, si implementa un modello parametrico tramite *APDL* che consideri la presenza di cricche in entrambi gli strati, per configurazioni $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$. Le proprietà elettriche del materiale sono sempre inerenti a laminati in fibra di carbonio con matrice dopata, i cui valori di resistività, nel sistema di riferimento delle singole lamine, sono riportati di seguito [1]:

$$\eta_{11} = 0,0303 [\Omega \cdot mm] \quad \eta_{22} = \eta_{33} = 114 [\Omega \cdot mm]$$

6.2 Modellazione

In questo caso non si riesce ad estrarre la superficie laterale del laminato come per il caso precedente poiché si dovrebbe estrarre contemporaneamente lungo due direzioni diverse e coincidenti con le direzioni delle fibre delle singole lamine. Pertanto, si modella opportunamente il *pattern* all'interfaccia tra le lamine. Ciascuna lamina avrà il proprio sistema di riferimento orientato secondo la direzione delle fibre, rispettivamente:

- *CSYS*, 11 sistema di riferimento della lamina uno;
- *CSYS*, 12 sistema di riferimento della lamina due.

Per rendere più visibile la rappresentazione geometrica, si utilizza il verde per la lamina uno e il rosso per la lamina due.

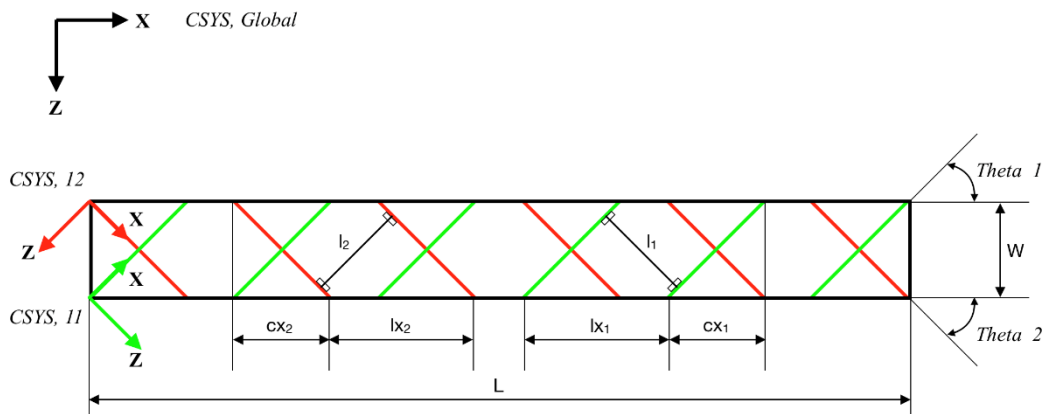


FIG.6.1 Vista sul piano XZ della metà superiore del laminato, dimensioni geometriche e sistemi di coordinate locali.

Per ovvie ragioni si presuppone che le due lamine abbiano le fibre orientate secondo il medesimo angolo in valore assoluto. Il file *APDL* è comunque parametrico e si potrebbero pertanto impostare due valori diversi per θ_1 e θ_2 , ma così facendo risulterebbe insensato poi imporre per entrambe le lamine il medesimo valore di *crack density*, che si presuppone sia diverso a parità di sforzo applicato; per di più la condizione $l_1=l_2$ e $\theta_1=\theta_2$ è necessaria per ricreare la geometria, l'area rettangolare del laminato viene infatti definita dai *KPs* delle quattro linee esterne.

Tuttavia, aumentando il valore della *crack density*, si devono aggiungere delle cricche esternamente che non interesseranno più tutta la larghezza del laminato ma sono comunque necessarie per garantire quel determinato valore di *crack density*.

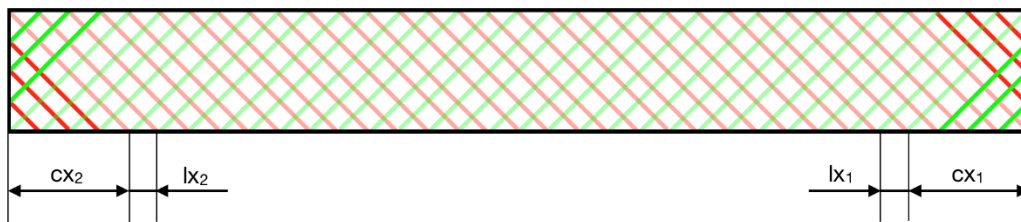


FIG.6.2 Cricche aggiunte, evidenziate alle estremità del laminato.

Definendo quindi la proiezione lungo x di una cricca che interessa tutta la larghezza del laminato come:

$$c_{xi} = W \cdot \tan(90 - \theta_i) \quad (6.1)$$

e la distanza tra le cricche lungo x come:

$$l_{xi} = \frac{l_i}{\sin(\theta_i)} \quad (6.2)$$

dove naturalmente l_i rappresenta il *crack spacing* della lamina i-esima, reciproco della *crack density* della lamina i-esima; si calcola il numero di cricche da aggiungere al numero di cricche comprese tra due vertici opposti del laminato del *pattern* di partenza:

$$c_{ai} = \left\lceil \frac{c_{xi}}{l_{xi}} \right\rceil \quad (6.3)$$

Il numero di cricche aggiunte trovate, andrà implementato da ambo gli estremi del laminato per ogni singola lamina. A questo punto l'idea è quella di estrudere tutte le aree che costituiscono il *pattern* contemporaneamente lungo y di una quota pari a $+h_1$ e $-h_2$. Così facendo si ottengono dei volumi separati tra di loro, quindi è come se fossero tutte delle cricche, ma aree e *keypoint* sono assolutamente coincidenti all'interfaccia, garantendo quindi continuità tra le due lamine. Per avere solo le cricche rappresentate inizialmente nel

pattern, posizionati nei rispettivi sistemi di riferimento delle singole lamine, si saldano i volumi compresi tra due cricche adiacenti tramite comando “*glue*”.

Si rappresenta la situazione in vista tridimensionale, trascurando le cricche aggiunte, per semplificarne la realizzazione.

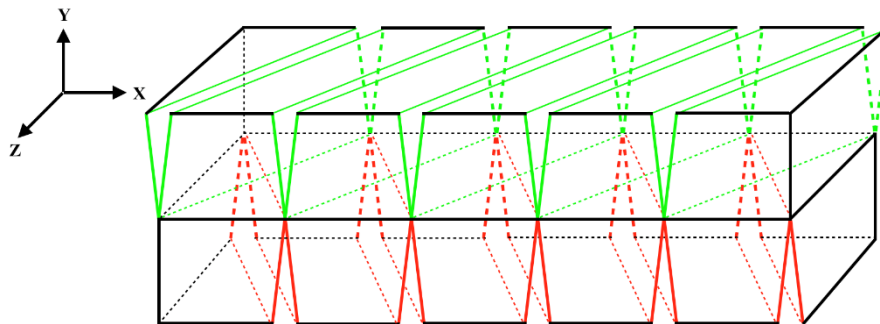


FIG.6.3 Rappresentazione tridimensionale della metà superiore del laminato.

Per verificare che il modello sia stato implementato correttamente, si esegue un’analisi meccanica semplicemente per verificare la corretta apertura delle cricche a seguito di un carico assiale applicato lungo x.

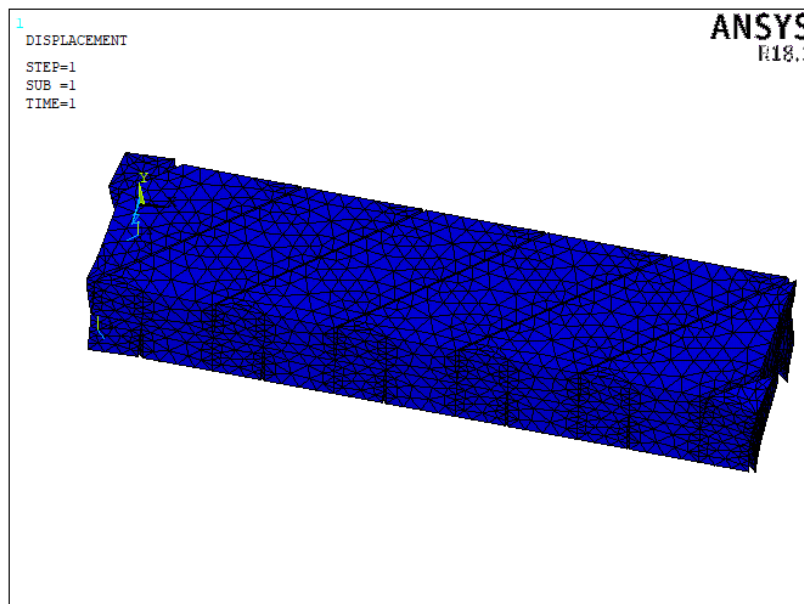


FIG.6.4 Rappresentazione tridimensionale della deformato, post applicazione di un carico statico. Si riporta la sola metà superiore del laminato.

Ritornando all’analisi elettrica, una volta orientati gli elementi delle lamine secondo i rispettivi sistemi di riferimento locali, si definiscono le condizioni al contorno. Si imposta pertanto, un potenziale pari ad 1 e 0 volt sulle superfici laterali del laminato nel piano YZ, garantendo quindi un $\Delta V_x = 1V$.

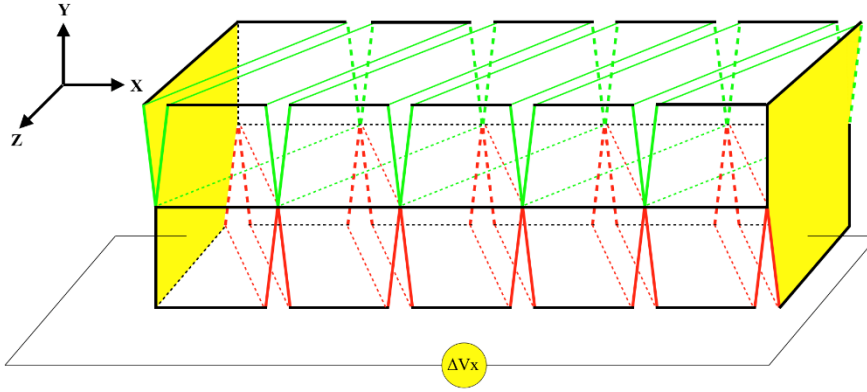


FIG.6. 5 Condizioni al contorno imposte sulla metà superiore del laminato.

Per questo modello si preferisce ragionare in termini di incremento di resistività elettrica η_x , inoltre, avendo ora le superfici esterne (gialle) che presentano delle cricche, si sceglie di non integrare la densità di corrente sulla superficie di ingresso ma di calcolarne il valore lungo x mediandolo nel volume. Quindi viene implementata in Ansys una *Element Table* che discretizzi l'integrale secondo quanto segue:

$$\bar{J}_x = \frac{1}{V} \cdot \int_V J_x \cdot dV \rightarrow \bar{J}_x = \frac{1}{V} \cdot \sum_{i=1}^N j_{xi} \cdot V_i \quad (6.4)$$

$$|\bar{\eta}_x| = \frac{E_x}{\bar{J}_x} = \frac{1}{\bar{J}_x \cdot L} \quad (6.5)$$

Per il non danneggiato volendo garantire la medesima geometria, si modella un provino secondo i medesimi passaggi sopra descritti con la differenza che, mentre prima post estrusione si saldavano i volumi compresi tra due cricche adiacenti, ora si saldano assieme tutti i volumi appartenenti rispettivamente alla lamina uno e alla lamina due.

Per entrambi i casi, danneggiato e non, si definiscono dei cicli che vadano di volta in volta a variare il valore della densità di cricche da un minimo di 0,2 [cricche/mm] ad un massimo di 2 [cricche/mm] ad intervalli di 0,2, per un totale dunque di 10 cicli per ogni *lay-up* analizzato.

I parametri di input tramite *APDL* sono i seguenti:

- **n**, numero di cricche comprese tra 2 vertici opposti del laminato;
- **ρ**, crack density [1/mm] → **l**, crack spacing [mm] → **l_x**, crack spacing lungo x [mm];
- **w**, larghezza del laminato [mm];
- **h₁**, altezza lamina 1 [mm];

- h_2 , altezza lamina 2 [mm];
- θ_1 , orientazione fibre lamina 1 [grad];
- θ_2 , orientazione fibre lamina 2 [grad].

Per ogni step dei vari cicli, gli unici parametri a subire variazioni sono quelli evidenziati in rosso, pertanto, imponendo un determinato numero di cricche, se la *crack density* aumenta diminuirà di conseguenza il *crack spacing* e dunque la lunghezza complessiva del laminato. Quindi per il danneggiato, in parte ci si aspetta che la resistività elettrica aumenti, a seguito del danneggiamento, e in parte che diminuisca, a seguito della riduzione di lunghezza, nel complesso si focalizzerà l'attenzione sul rapporto η_x/η_{x0} piuttosto che sui singoli valori. Si testano esclusivamente laminati del tipo $[(+\theta)_n/(-\theta)_n]_s$ con valori di teta pari a 30° , 45° e 60° e n pari a 1, 2, 3 e 4. Si impostano spessori delle singole lamine pari a 0,3 mm, un numero di cricche comprese tra 2 vertici opposti pari a 5 ed infine una larghezza unitaria del laminato pari ad 1 mm. Si riportano successivamente i risultati ottenuti.

6.3 Risultati

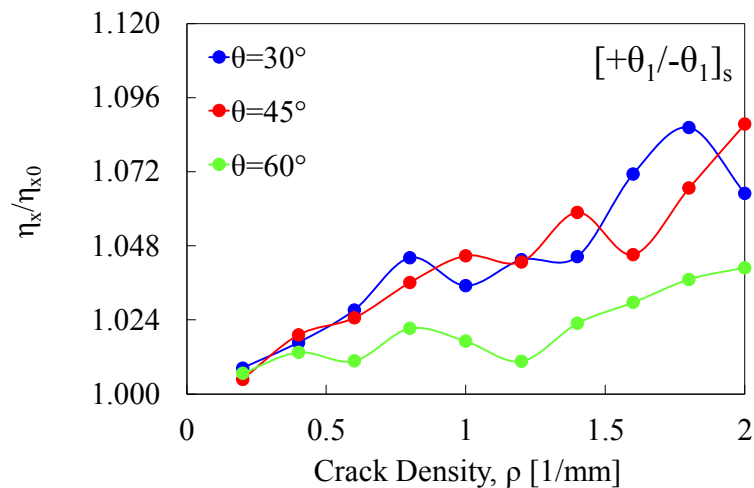


FIG.6.6 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[(+\theta_1/-\theta_1)_s]$.

Si interrompe l'analisi poiché i risultati ottenuti sono insensati, non solo in termini di sensibilità la situazione si è capovolta rispetto alle analisi precedenti (più sensibili laminati $[(+30_1/-30_1)_s]$ e meno sensibili laminati $[(+60_1/-60_1)_s]$) ma i valori di resistività allo stato non danneggiato sono diversi all'interno del medesimo ciclo, andando a violare una proprietà intrinseca del materiale che non dovrebbe essere in alcun modo influenzata dalla lunghezza del laminato modellato.

Temendo sia un problema numerico, si riporta a titolo informativo quanto ottenuto riducendo la larghezza del laminato a 0,5 mm e diminuendo l'*element size* al fine di rendere l'analisi più accurata.

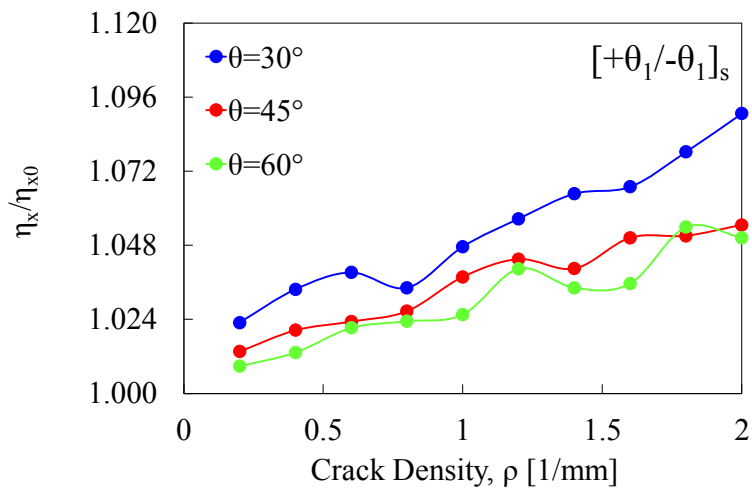


FIG.6.7 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+\theta_1/-\theta_1]_s$.

I valori di resistività allo stato non danneggiato sono ancora diversi all'interno del medesimo ciclo.

Si riportano a titolo di esempio dei risultati di ANSYS ottenuti con *crack density* pari ad 1 [cricche/mm] per un *lay-up* $[+30/-30]_s$ dove si può osservare come la corrente si distribuisca all'interfaccia tra le due lamine. Si procederà in seguito ad analizzare nello specifico il problema legato alla variazione di resistività del materiale.

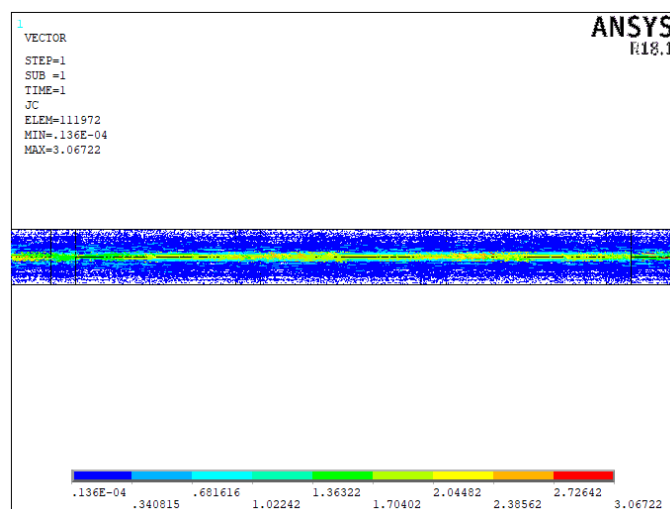


FIG.6.8 Densità di corrente (Jc).

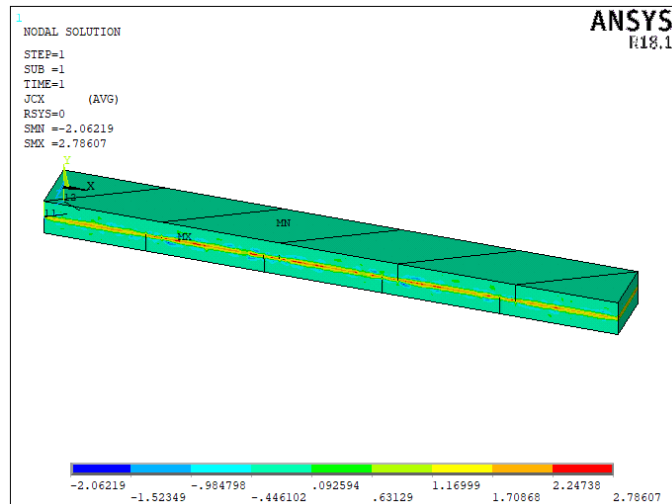


FIG.6.9 Densità di corrente lungo l'asse X (J_{cX}).

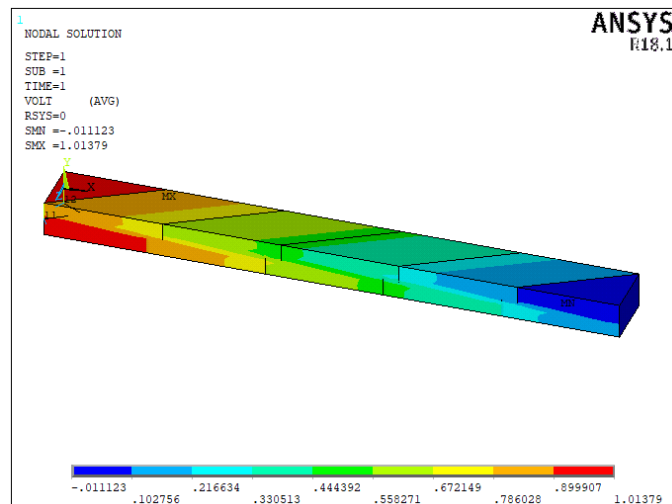


FIG.6.10 Potenziale elettrico (EV).

Come ultimo tentativo si modifica il file *APDL* del modello descritto ad inizio capitolo in modo tale da imporre una lunghezza complessiva del laminato che si vuole resti costante durante tutto il ciclo. Questo perché si vorrebbe testare un provino in scala 1:1 o al massimo 1:2. Pertanto, ad ogni iterazione si calcola il numero di cricche necessarie per garantire quel determinato valore di *crack density*.

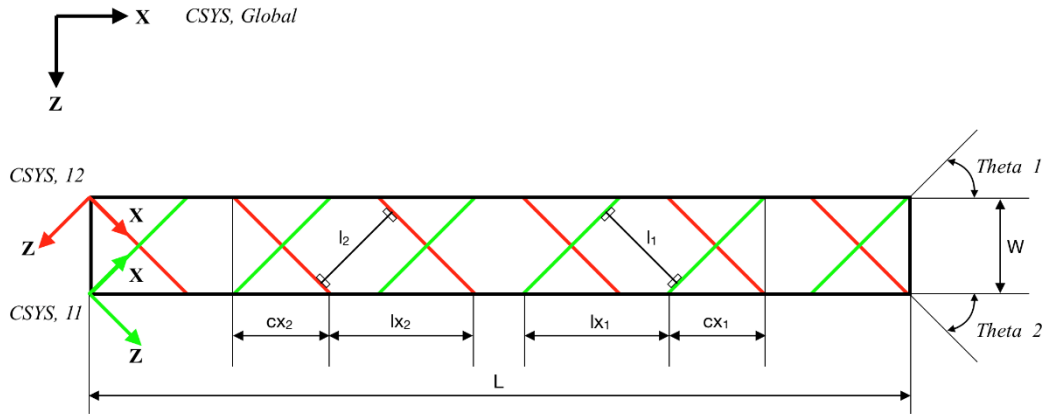


FIG.6.11 Vista sul piano XZ della metà superiore del laminato, dimensioni geometriche e sistemi di coordinate locali.

Nota che:

$$L = [l_x \cdot (n_c - 1)] + c_x \quad (6.6)$$

$$l_x = \frac{l}{\sin(\theta)} = \frac{1}{\rho \cdot \sin(\theta)} \quad (6.7)$$

$$c_x = W \cdot \tan(90 - \theta) \quad (6.8)$$

dove L è la lunghezza complessiva del laminato, n_c il numero di cricche comprese tra due vertici opposti, l_x il *crack spacing* lungo x e c_x la proiezione di una cricca lungo x.

$$n_{ci} = \frac{L - c_x}{l_x} + 1 = \frac{L - W \cdot \tan(90 - \theta)}{\frac{1}{\rho \cdot \sin(\theta)}} + 1 \quad (6.9)$$

Si definisce così il numero di cricche in input ad ogni iterazione, tale valore però verrà arrotondato all'intero più vicino per cui la lunghezza effettiva del laminato ad ogni ciclo sarà simile al valore imposto ma non uguale. Per tale ragione, si ciclano al medesimo modo il laminato danneggiato e quello non danneggiato.

Si conduce un'analisi imponendo una lunghezza complessiva pari a 10 mm, una larghezza unitaria pari ad 1 mm e spessori delle singole lamine pari a 0,3 mm.

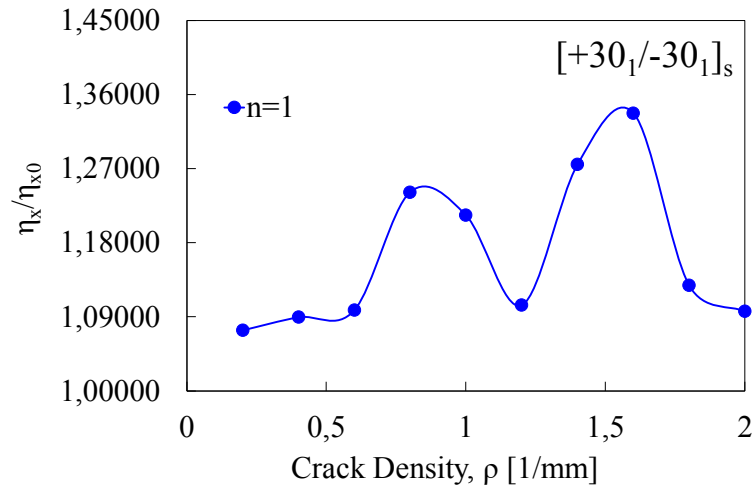


FIG.6.12 Normalizzazione della resistività elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+30_1/-30_1]_s$.

Ancora una volta si sono ottenuti risultati diversi e valori di resistività, allo stato non danneggiato, variabili ad ogni iterazione.

6.4 Commenti

Si eseguono delle verifiche in termini di resistenza elettrica e resistività elettrica su un cubetto di materiale non danneggiato costituito semplicemente da due lamine e avente le seguenti proprietà:

- $lay-up = [+30_1/-30_1]_s$;
- $L = 1 \text{ mm}$, $w = 1 \text{ mm}$, $h_1 = 0,3 \text{ mm}$, $h_2 = 0,3 \text{ mm}$;
- $\eta_1 = 0,0303 \Omega \cdot \text{mm}$, $\eta_2 = 114 \Omega \cdot \text{mm}$.

Si discretizza il solido con una *mesh mapped*, si impone un $\Delta V_x = 1V$ esattamente come le analisi precedenti e si definisce la solita *element table*. Infine, si lanciano delle soluzioni andando via via a ridurre il valore dell'*element size*. Si noti in Figura 6.13 e Figura 6.14 come la resistenza elettrica, e dunque la resistività elettrica, aumentino con il diminuire della dimensione degli elementi. Sembra quindi che il problema dell'analisi precedente sia legato ad una mancanza di convergenza in termini di *element size*, ma questo non può essere poiché già in corrispondenza di una *mesh* grossolana (0,075 mm) il valore di resistività (0,073 $\Omega \cdot \text{mm}$) è comunque più elevato di quando trovato tramite *CLT* elettrica (Capitolo 2) e confermato anche con il modello dell'*RVE* (Capitolo 4). Infatti, per un *lay-up* del tipo $[+30_1/-30_1]_s$ avente le proprietà sopra descritte, il valore della resistività elettrica, allo stato non danneggiato, dovrebbe essere pari a 0,0404 $\Omega \cdot \text{mm}$.

Per cui, più si discretizza meglio il problema, riducendo le dimensioni degli elementi, più ci si allontana dal valore effettivo.

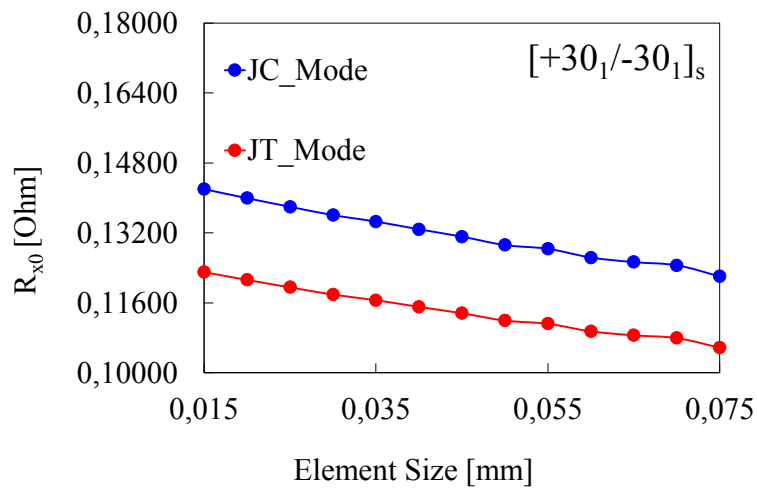


FIG.6.13 Resistenza elettrica iniziale in funzione della dimensione degli elementi, per laminati simmetrici [+30₁/-30₁]_s.

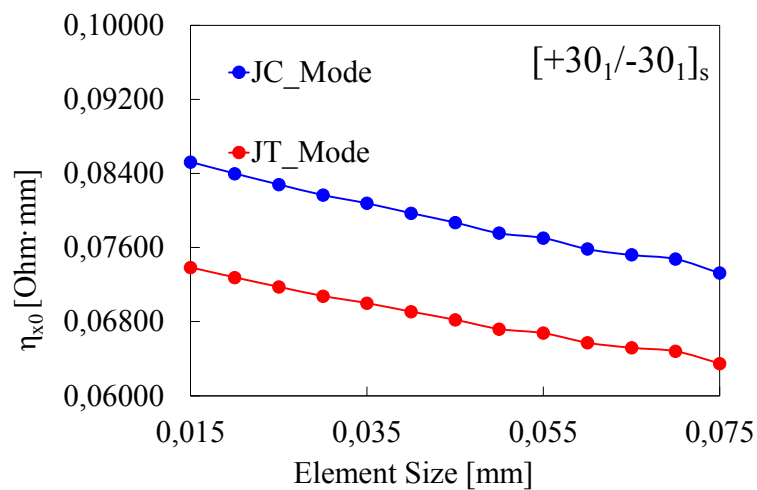


FIG.6.14 Resistività elettrica iniziale in funzione della dimensione degli elementi, per laminati simmetrici [+30₁/-30₁]_s.

Le analisi sono state eseguite sfruttando due tipi diversi di densità di corrente così definite nel manuale “*Mechanical APDL Command Reference*” di Ansys:

JT - Total measurable current density in low-frequency electromagnetic analyses. (Conduction current density in a low-frequency electric analysis.) Components (X, Y, Z) and vector sum (SUM).

JC - Conduction current density for elements that support conduction current calculation. Components (X, Y, Z) and vector sum (SUM).

Si noti come la corrente torni a distribuirsi lungo tutto lo spessore e non solo all’interfaccia.

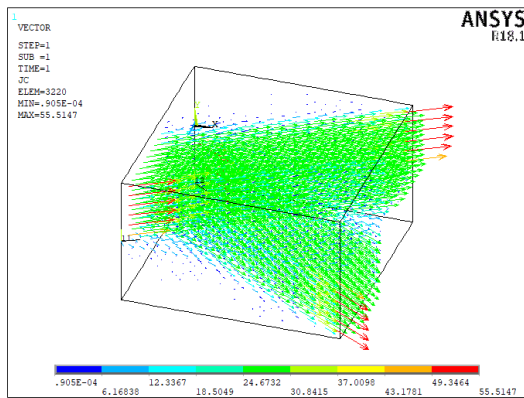


FIG.6.15 Densità di corrente (J_C).

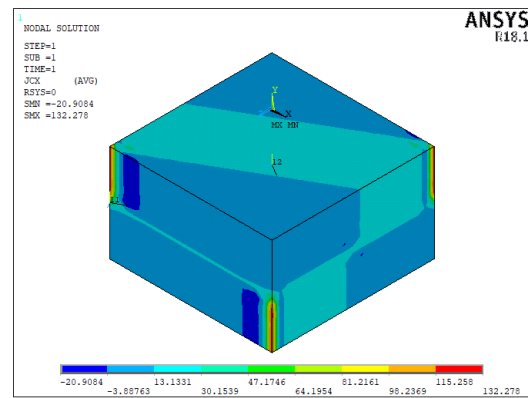


FIG.6.16 Densità di corrente lungo l'asse X (J_{CX}).

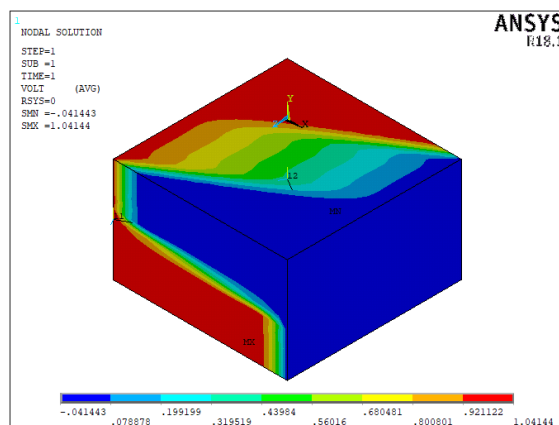


FIG.6.17 Potenziale elettrico (EV).

Infine, temendo che l'errore possa nascere dal fatto che i valori di conducibilità del carbonio hanno ben 4 ordini di grandezza, tra le misurazioni in piano e le misurazioni fuori piano, si testa il medesimo volume di materiale con un paio di analisi, inserendo le proprietà del vetro [2] ma il risultato non cambia, la resistività resta comunque influenzata dalla *mesh*.

Si cerca una soluzione, provando a mantenere inalterata la *mesh* e modificando la lunghezza di una singola lamina, avente sempre larghezza unitaria e orientazione delle fibre di 30° , ma non si riesce a garantire la corretta proporzionalità tra resistenza elettrica e lunghezza, che viene garantita solamente con angoli di inclinazione delle fibre pari a 0° o 90° .

L [mm]	5	7.5	10
R_{x0} [Ω]	5.935	9.296	12.658
inc. [%]	0	56.6	113.3
R_{x0}/L [Ω/mm]	1.19	1.24	1.27

Infatti, secondo la legge di Ohm mantenendo inalterate le proprietà elettriche di un conduttore e la sezione trasversale, i valori della resistenza elettrica sono direttamente proporzionali alla lunghezza del conduttore stesso. Per cui, raddoppiando la lunghezza della lamina, si dovrebbe ottenere un valore di resistenza elettrica esattamente pari al doppio, con un incremento quindi pari al 100 %.

Per finire, pensando alle condizioni al contorno imposte sull'*RVE*, si impostano delle *constrain equation* tra le facce laterali sempre del volume di materiale precedentemente analizzato. Le condizioni di periodicità sono le medesime definite per l'*RVE* allo stato non danneggiato, quindi, interessano tutto lo spessore del cubetto.

I valori di resistività allo stato non danneggiato tornano così ad essere identici a quelli calcolati tramite *CLT* elettrica e precisamente:

- $[+30_n/-30_n]_s \rightarrow \eta_{x0} = 0,040396 \Omega \cdot \text{mm};$
- $[+45_n/-45_n]_s \rightarrow \eta_{x0} = 0,060584 \Omega \cdot \text{mm};$
- $[+60_n/-60_n]_s \rightarrow \eta_{x0} = 0,121103 \Omega \cdot \text{mm}.$

Inoltre, tali valori non sono più influenzati né dalla *mesh* né dalla lunghezza del cubetto di materiale. Infatti, raddoppiando la lunghezza raddoppia il valore di resistenza elettrica, mantenendo invariato il valore di resistività.

Pensando di imporre delle equazioni di periodicità per entrambi i modelli numerici, relativi al capitolo precedente e al capitolo seguente, è necessario fare delle considerazioni.

Se nel modello non danneggiato è sufficiente implementare delle *constrain equation* tra i nodi delle facce laterali del laminato, aventi la medesima quota lungo *x*; per il modello che prevede danneggiamento, le condizioni di periodicità andrebbero imposte tra nodi omonimi appartenenti alle facce opposte comprese tra due cricche adiacenti. Tale implementazione, non solo risulta impossibile per i nodi in prossimità dei vertici esterni, che andrebbero legati con delle porzioni di spazio esterne al laminato stesso, ma ricondurrebbero l'analisi al caso dell'*RVE*, trattato nel Capitolo 4.

6.5 Referenze

- [1] Michele Zappalorto, Francesco Panozzo, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical response of a laminate with a delamination: modelling and experiments*, Composite Science and Technology, 143, 2017, p.31-45.
- [2] Francesco Panozzo, Michele Zappalorto, Paolo Andrea Carraro, Marino Quaresimin, *Electrical resistance change vs damage state in cracked symmetric laminates: A closed form solution*, Composite Structures, 184, 2018, p.1081-1091.

ANALISI CRITICA DEI RISULTATI DI MODELLAZIONE

A fronte delle analisi svolte si possono trarre alcune considerazioni fondamentali.

Il modello analitico (Capitolo 3), che implementa l'incremento di resistenza elettrica a seguito di un progressivo incremento di *crack density* su laminati simmetrici, prevede un solo strato criccato. Pertanto, se si vogliono considerare laminati diversi da unidirezionali e *cross-ply*, il modello non è perfettamente rispecchiante la situazione reale. Infatti, considerando laminati aventi *lay-up* del tipo $[(\theta_1)_n/(\theta_2)_m]_s$, con angoli compresi tra 0° e 90° estremi esclusi, nella realtà il danneggiamento, in termini di densità di cricche, interesserà tutti gli strati del laminato e, a parità di orientazione delle fibre, dovrebbe essere equiparabile per tutte le lamine. Quindi, volendo valutare in prima analisi anche laminati con angoli di *off-axis* diversi da 0° e 90° , meglio considerare il modello implementato nel Capitolo 4, relativo ad un elemento di volume rappresentativo che preveda la presenza di cricche su tutti i *layer*, con la consapevolezza che quest'ultimo, per ovvie ragioni, non è valido per laminati *cross-ply*.

Le stesse valutazioni del modello analitico possono essere fatte anche per il modello numerico trattato nel Capitolo 5, ponendo attenzione però al fatto che i risultati tra i due modelli sono concordi solo se si analizzano dei laminati *cross-ply*.

Infine, l'ultimo modello numerico trattato nel Capitolo 6, che prevede la presenza di danneggiamento su entrambi gli strati, come per l'*RVE*, è valido per laminati simmetrici aventi angoli di *off-axis* diversi da 0° e 90° . Tuttavia, come si è potuto osservare nella trattazione, se si svincola il problema da equazioni di periodicità e dunque da elementi rappresentativi, andando fisicamente a modellare metà laminato (una delle due parti simmetriche), subentrano problemi legati alla non costanza di resistività a parità di condizioni. Confrontato le analisi, la causa sembra circoscritta ad effetti di bordo. Tuttavia, tali problematiche affiorano solo nel caso in cui gli angoli siano diversi da 0° e 90° .

Potrebbe trattarsi di un problema numerico di Ansys, infatti, qualora gli angoli di orientazione delle singole lamine siano pari a 0° , le proprietà ortotrope del materiale sono le medesime che verranno attribuite agli elementi nel sistema di riferimento di struttura. Pertanto, la matrice $[\Gamma^i]$ (Eq. 2.3a) contenente le proprietà elettriche del materiale sarà identica alla corrispondente matrice $[\bar{\Gamma}^i]$ (Eq. 2.4) contenente le proprietà apparenti.

$$[\bar{\Gamma}^i(0^\circ)] = \begin{bmatrix} \eta_1^i & 0 \\ 0 & \eta_2^i \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Allo stesso modo, con angoli di orientazione delle singole lamine pari a 90° , l'unica variazione nella matrice di struttura del singolo elemento è un'inversione degli elementi appartenenti alla diagonale principale.

$$[\bar{\Gamma}^i(90^\circ)] = \begin{bmatrix} \eta_2^i & 0 \\ 0 & \eta_1^i \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Mentre variando gli angoli di *off-axis* rispetto ai due casi precedenti, compariranno i corrispettivi contributi di accoppiamento, inficiando sulle proprietà apparenti del singolo elemento valutate nel sistema di riferimento di struttura.

Alternativamente, se non dovesse essere un problema numerico, si può pensare che nel momento in cui si presenta almeno una lamina avente le fibre orientate a 0° , la corrente si distribuisca su quest'ultima, avendo la lamina stessa un'elevata conducibilità lungo la direzione principale del laminato, e prosegua indisturbata lungo tutta la lunghezza del laminato stesso, non risentendo della presenza di alcun bordo.

Effetti di bordo non sono considerati né sulla *CLT* elettrica (Capitolo 2), né sul modello con *RVE* (Capitolo 4). In quest'ultimo infatti, si nota subito come, a differenza dei modelli numerici di un laminato con uno od entrambi gli strati criccati, la corrente si distribuisca lungo tutto lo spessore e non solo ed esclusivamente all'interfaccia. Questo sicuramente è dovuto alle *Constrain Equation* che impongono una periodicità che svincola il modello dalla presenza di qualsiasi effetto di bordo.

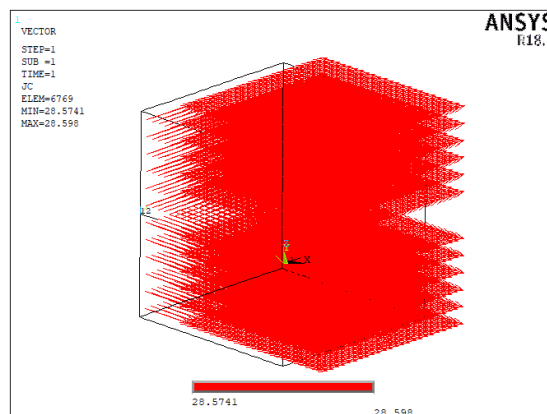


FIG.7.1 Densità di corrente (*JC*).
RVE con *crack density* pari ad 1 e *lay-up* [+30/-30].

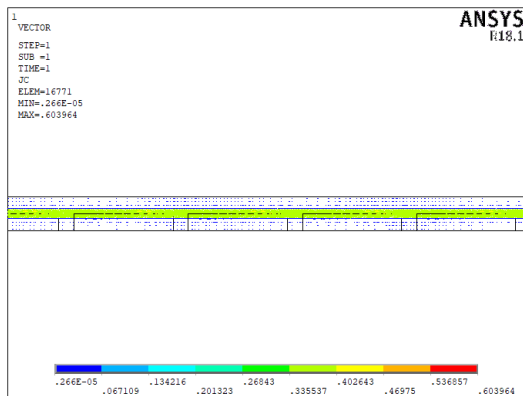


FIG.7.2 Densità di corrente (J_C).
Laminato con un solo strato criccato, $crack\ density$ pari ad 1 e $lay-up$ [+30/-30]_s.

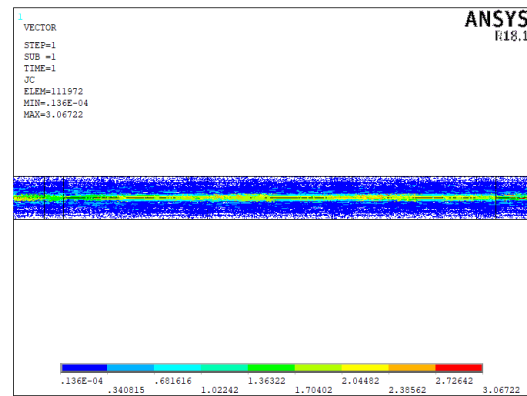


FIG.7.3 Densità di corrente (J_C).
Laminato con entrambi gli strati criccati, $crack\ density$ pari ad 1 e $lay-up$ [+30/-30]_s.

Si sottolinea a tal proposito come, in tutti i modelli trattati, il materiale sia stato considerato come elettricamente ortotropo e internamente omogeneo. Con queste condizioni, all'interfaccia tra le due lamine si crea una direzione preferenziale per la corrente, costituita dalla sovrapposizione delle due direzioni principali delle rispettive lamine, lungo le quali si ha la massima conducibilità elettrica e la minor resistività.

Tuttavia, in realtà il materiale, seppur elettricamente ortotropo, internamente è categoricamente disomogeneo, costituito infatti da resina epossidica e fibre di carbonio. Se la corrente dovesse distribuirsi all'interfaccia, comunque tenderebbe a seguire il *pattern* relativo alla sovrapposizione delle fibre di uno strato con l'altro. Quindi non seguirebbe un percorso perfettamente rettilineo allineato lungo la direzione di alimentazione. Inoltre, non è assolutamente detto che si concentri necessariamente all'interfaccia; infatti se dovesse esserci uno strato di matrice, per quanto possa essere dopata con nanotubi di carbonio, se confrontata elettricamente con le fibre, la si può equiparare ad un isolante, andando ad escludere l'ipotesi della concentrazione della corrente in questa zona.

Comunque si può affermare sicuramente che in tutti i modelli si percepisce una sensibilità al danneggiamento più o meno accentuata, valutata in termini di incremento di resistenza elettrica o resistività.

Pertanto, in virtù delle valutazioni eseguite, si decide di considerare come laminati più sensibili, laminati simmetrici aventi angoli di *off-axis* pari a $\pm 60^\circ$, con la consapevolezza che il monitoraggio strutturale mediante misure elettriche in questo caso è stato circoscritto alla sola presenza di cricche matriciali.

Visti gli incrementi di resistività comunque molto esigui relativi al modello con *RVE*, si focalizza l'attenzione sui risultati ottenuti con il modello numerico su provino intero con uno strato criccato, per il quale sono stati ottenuti i massimi incrementi.

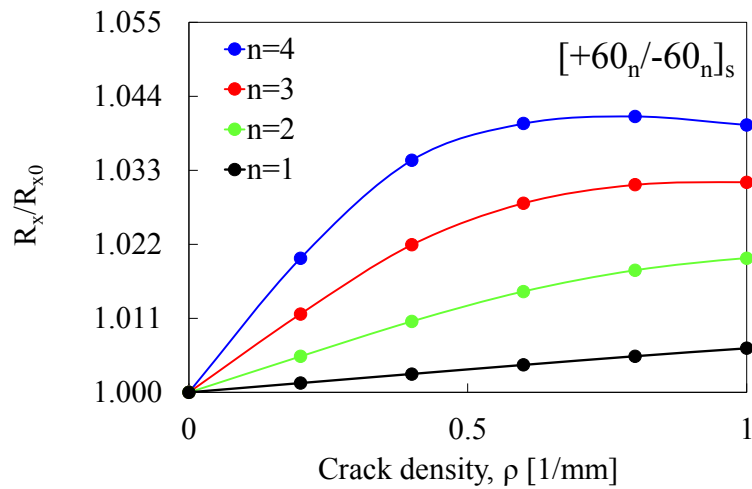


FIG.7.4 Normalizzazione della resistenza elettrica rispetto al valore iniziale, in funzione della densità di cricche, per laminati simmetrici $[+60_n/-60_n]_s$.

Quindi, si realizzerà un laminato $[+60_n/-60_n]_s$. Successivamente, a corredo della campagna sperimentale, si testeranno comunque anche laminati *cross-ply*, avendo trovato risultati concordanti tra il modello analitico e il modello numerico con uno strato criccato, oltre al fatto di poter godere di una raccolta letteraria sperimentale di confronto adeguata (Capitolo 1).

CAMPAGNA SPERIMENTALE

8.1 Introduzione

Si vuole testare sperimentalmente quanto analizzato con i precedenti modelli analitici e numerici. Il materiale a disposizione è una bobina di *pre-preg*, materiale composito fibrorinforzato pre-impregnato, nel quale assieme alle fibre di carbonio è già presente una matrice in resina epossidica, dopata con nanotubi di carbonio al fine di incrementarne la conducibilità elettrica della stessa. Poiché la matrice è solo parzialmente reticolata, in modo che sia possibile manipolare il materiale facilmente (materiale di stadio B), si conserva l'intera bobina in un refrigeratore e la si scongela solo all'occorrenza.

Il processo produttivo del laminato dovrà quindi avvenire in autoclave, potrebbe avvenire anche in forno per la semplice reticolazione della matrice ma non si avrebbe nessun controllo sulla pressione. Si analizzano di seguito le fasi fondamentali necessarie per la suddetta campagna sperimentale, dalla realizzazione dei provini fino alla preparazione necessaria per le singole prove di *health monitoring*.

8.2 Preparazione

I laminati in fibra di carbonio che verranno prodotti, indispensabili per la realizzazione dei campioni, saranno complessivamente tre:

1. laminato unidirezionale con *lay-up* $[0_8]$ per caratterizzazione elettrica e meccanica;
2. laminato simmetrico *angle-ply* con *lay-up* $[+60_3/-60_3]_s$ per *health monitoring*;
3. laminato simmetrico *cross-ply* con *lay-up* $[0_2/90_4]_s$ per *health monitoring*.

Mentre un ulteriore laminato, indispensabile per le prove che dovranno essere eseguite, verrà prodotto per la realizzazione delle *tab*. Si tratta di un laminato simmetrico *cross-ply*, in fibra di vetro, avente *lay-up* pari a $[0/90]_s$. Se ne farà un breve cenno a fine capitolo.

8.2.1 Preparazione degli stampi

Si utilizza sempre uno stampo in vetro delle dimensioni di 29 cm per 38 cm.

Inizialmente bisogna assicurarsi che non vi siano residui di resina e altro materiale dei processi produttivi precedenti; muniti quindi di una lametta si rimuove qualsiasi sporcizia dalle superfici e dai bordi dello stampo fin tanto che il tutto non risulti perfettamente liscio.

A pulizia terminata si passa dell'acetone un paio di volte su tutto lo stampo e, se dovesse essere necessario, anche uno specifico pulitore per stampi. I bordi dello stampo sono smussati ma costituiscono in ogni caso un potenziale pericolo di foratura per il sacco da vuoto, si dispone quindi del nastro, apposito per alte temperature, lungo tutti i bordi dello stampo e si rivestono gli spigoli con della gomma butilenica, anch'essa ricoperta successivamente con del nastro. Terminata la procedura si deve preparare la superficie dello stampo sulla quale verranno posizionati i film di *pre-preg* con del distaccante di tipo liquido, idoneo per le alte temperature e dunque per l'utilizzo in autoclave. In tutto vengono distesi due film di distaccante, ciascuna operazione viene eseguita a distanza di almeno 30 minuti l'una dall'altra.

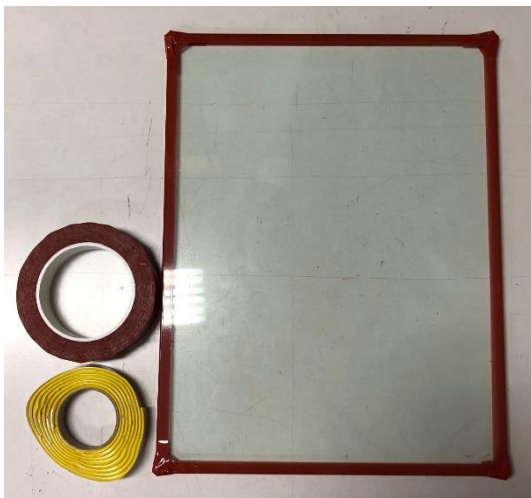


FIG.8.1 Stampo in vetro, nastro e gomma butilenica.



FIG.8.2 Dettaglio della protezione applicata ad uno spigolo dello stampo.

8.2.2 Preparazione del materiale

Prima di maneggiare il materiale lo si scongela a temperatura ambiente per almeno 2 ore, in modo da evitare di danneggiarlo maneggiandolo quando è ancora congelato e dunque fragile. Si ricorda che il materiale ogni volta dev'essere riposto all'interno del refrigeratore, all'interno di un sacco opportunamente chiuso, al fine di evitare l'infiltrazione di umidità che successivamente in autoclave si trasformerebbe in porosità, compromettendo seriamente le proprietà meccaniche del laminato finale.

A partire dalla bobina di *pre-preg* disponibile, si procede tagliandola in funzione dei corrispettivi laminati che si devono realizzare, nello specifico:

1. con 8 *ply* dalle dimensioni di 31,5 cm per 25 cm ciascuno, si realizza un laminato **UD [0₈]**;

2. con 12 *ply* dalle dimensioni di 35 cm per 22 cm ciascuno, si realizza un laminato *Angle-Ply* [+60₃/-60₃]_s;
3. Con 12 *ply* dalle dimensioni di 31,5 cm per 23,6 cm ciascuno, si realizza un laminato *Cross-Ply* [0₂/90₄]_s.

Le dimensioni dei singoli strati sono state definite ogni volta con lo scopo di ridurre lo spreco di materiale, ottimizzandone quindi il taglio in funzione della larghezza finita della bobina, pari a 94,5 cm.



FIG.8.3 Bobina di materiale *pre-preg*.

Le lamine così ottenute vengono posizionate sullo stampo assicurandosi di garantire la corretta orientazione delle fibre di ogni singolo strato. Per il posizionamento, si considera come riferimento uno dei quattro lati di un *ply* e, ad ogni applicazione successiva, si cerca di garantirne l'allineamento.



FIG.8.4 Posizionamento del primo *ply*.



FIG.8.5 Posizionamento dei *ply* successivi.

Ogni lamina presenta due film protettivi per evitare che il materiale si attacchi su sé stesso quando arrotolato e per facilitarne la messa in posa, oltre che per evitarne il contatto diretto e dunque la contaminazione. Si riporta un'immagine rappresentativa del laminato unidirezionale a seguito dell'applicazione di tutti ed otto gli strati.

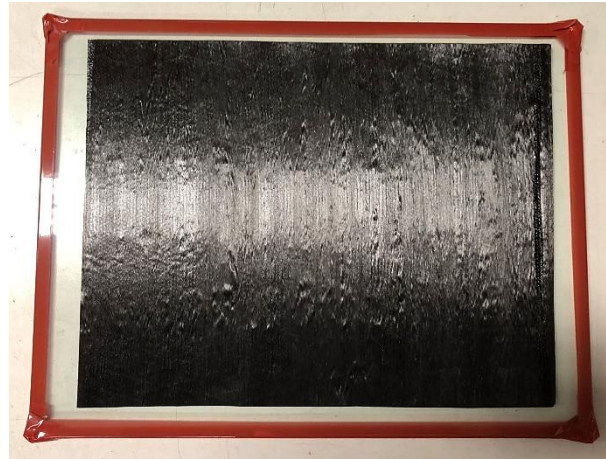


FIG.8.6 Laminato unidirezionale [0₈] pre-autoclave.

Si procede con la preparazione del sacco da vuoto, si tratta di un sacco cilindrico le cui estremità risultano quindi aperte. Muniti sempre di gomma butilenica, si prepara un'estremità del sacco, che verrà sigillata solo dopo aver inserito lo stampo, e si sigilla l'estremità opposta, assicurandosi che non vi siano raggrinzamenti e dunque possibili passaggi per l'aria che andrebbero ad inficiare la tenuta sottovuoto.



FIG.8.7 Preparazione del sacco da vuoto.



FIG.8.8 Sigillatura parziale e totale delle due estremità del sacco da vuoto.

8.2.3 Assemblaggio

Sopra al laminato vengono posizionati in ordine:

1. *un film distaccante*, che in questo caso non è microforato; i micro-fori si utilizzano per garantire una fuoriuscita della resina dal materiale al fine di incrementare il rapporto fibre volume e dunque per aumentare le proprietà meccaniche ma, non conoscendo esattamente la frazione di fibra, si decide di utilizzare il film non forato e misurarne la frazione esatta in fase di caratterizzazione del materiale;
2. *uno strato distributore del vuoto*, con il quale si cerca di garantire una depressione omogenea all'interno del sacco, l'ugello attraverso il quale viene tirato il vuoto viene infatti posizionato al di fuori della superficie occupata dallo stampo ed è solamente uno.



FIG.8.9 Film distaccante.

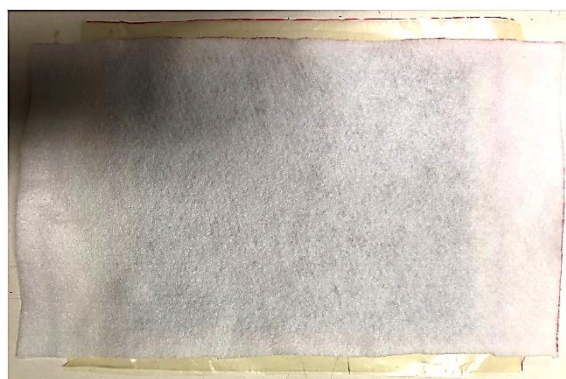


FIG.8.10 Strato distributore del vuoto.

Successivamente si inserisce tutto all'interno del sacco, introducendovi anche l'ugello. Si posiziona anche per quest'ultimo uno strato distributore del vuoto e un film distaccante alla base dello stesso, qualora dovessero esserci delle fuoriuscite di resina. Si pone attenzione ad interessare, con il film distaccante, solamente metà valvola, altrimenti la si andrebbe ad occludere completamente, impendendone il tiraggio del vuoto.

Trovato il corretto posizionamento dell'ugello, si esegue un piccolo foro nel sacco, attraverso il quale si provvede alla fuoriuscita della parte superiore della valvola e corrispettiva filettatura necessaria per il serraggio successivo.



FIG.8.11 Posizionamento dello stampo all'interno del sacco da vuoto.



FIG.8.12 Foratura del sacco per garantire la fuoriuscita della valvola.

Infine, si testa che il sacco non sia forato o non ci siano dei passaggi d'aria, provando a tirare il vuoto tramite l'ugello, per una depressione totale pari a -1 bar, e lo si lascia depressurizzato, scollegando completamente il compressore.



FIG.8.13 Fase di tiraggio del vuoto.



FIG.8.14 Scollegamento del compressore da vuoto e verifica tenuta.

8.3 Autoclave

Si dispone il tutto all'interno dell'autoclave e si posizionano delle termocoppie necessarie per eventuali monitoraggi della temperatura.

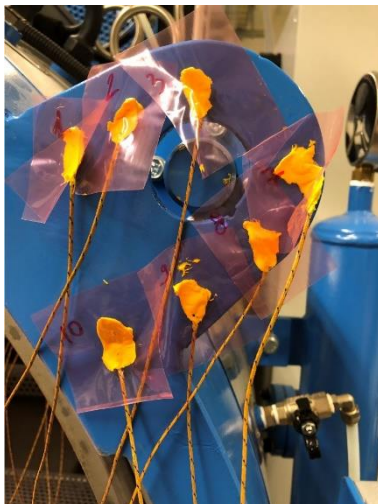


FIG.8.15 Dettaglio delle termocoppie.

Vengono collocate quattro termocoppie sotto allo stampo in corrispondenza dei quattro vertici del laminato, rispettivamente la 7^a in fondo a sinistra, l'8^a in fondo a destra, la 9^a davanti a destra e la 10^a davanti a sinistra; altre due termocoppie sopra allo stampo in corrispondenza delle due estremità del laminato (numero 2 e numero 3) ed una esterna allo stampo stesso (numero 1). Ciascuna termocoppia viene rivestita con gomma butilenica per evitare che in fase di pressurizzazione dell'autoclave il sacco venga danneggiato.

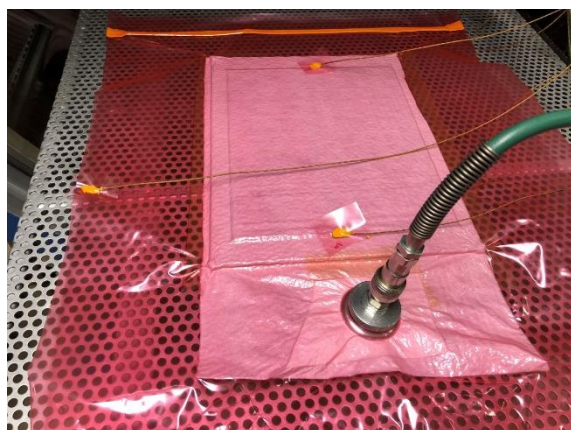


FIG.8.16 Posizionamento all'interno del carrello dell'autoclave e collocamento delle termocoppie.



FIG.8.17 Dettaglio di una termocoppia.

Infine, si configura il ciclo che l'autoclave dovrà eseguire, suddividendolo in otto fasi complessive. Si osservino nello specifico i parametri impostati per ogni fase definita.

Fase 1 - SET INIZIALE	
Tempo [min]	5.0
Set Point Temperatura [°C]	30.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	0.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 2 - RISCALDAMENTO	
Tempo [min]	15.0
Set Point Temperatura [°C]	120.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	0.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 3 - INERZIA STAMPI	
Tempo [min]	15.0
Set Point Temperatura [°C]	120.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	0.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 4 - PRESSIONE	
Tempo [min]	5.0
Set Point Temperatura [°C]	120.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	3.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 5 - MANTENIMENTO	
Tempo [min]	120.0
Set Point Temperatura [°C]	120.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	3.01
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 6 - RAFFREDDAMENTO 1	
Tempo [min]	40.0
Set Point Temperatura [°C]	60.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	3.02
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 7 - DEPRESSIONE	
Tempo [min]	5.0
Set Point Temperatura [°C]	60.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	0.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Fase 8 - RAFFREDDAMENTO 2	
Tempo [min]	20.0
Set Point Temperatura [°C]	40.0
Banda Morta Temperatura [°C]	5.0
Set Point Pressione [bar]	0.00
Banda Morta Pressione [bar]	0.20
Set Point Vuoto [bar]	-1.00

Si riporta il ciclo di cura complessivo in Figura 8.18. Si sottolinea che i seguenti parametri sono stati mantenuti tali per la realizzazione di tutti e tre i laminati in fibra di carbonio, trattandosi del medesimo materiale.

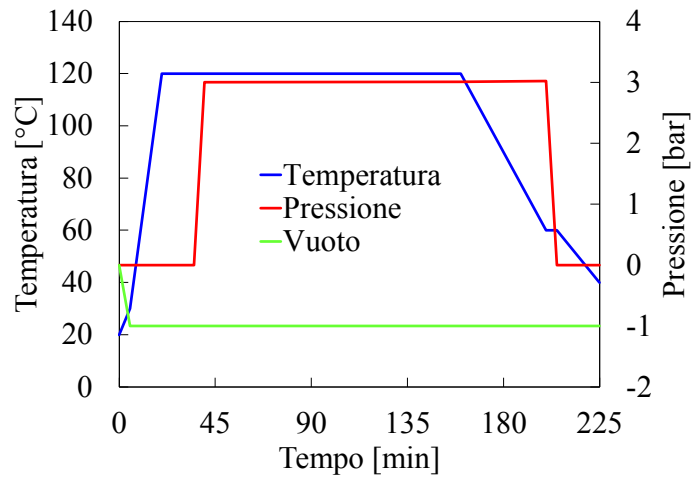


FIG. 8.18 Ciclo di cura in autoclave.

8.4 Troncatura e lucidatura

Atteso il raffreddamento del pezzo, si taglia il sacco e si rimuove delicatamente il laminato dagli stampi.



FIG. 8.19 Laminato $[+60_3/-60_3]_s$ post-autoclave.



FIG. 8.20 Laminato $[0_2/90_4]_s$ post-autoclave.

Con una troncatrice si ricavano con i singoli laminati i corrispettivi provini. Nello specifico:

1. 9 provini dal laminato UD $[0_8]$, dei quali tre con *lay-up* $[0_8]$, tre con *lay-up* $[45_8]$ e tre con *lay-up* $[90_8]$; necessari per caratterizzare il materiale sia meccanicamente che elettricamente;
2. 13 provini dal laminato *Angle-Ply* $[+60_3/-60_3]_s$, mantenendo lo stesso *lay-up*;
3. 11 provini dal laminato *Cross-Ply* $[0_2/90_4]_s$, mantenendo lo stesso *lay-up*.

Avendo ora a disposizione i singoli campioni, si procede lucidando le superfici laterali di taglio, definite appunto *cut edge*. Questa operazione non solo preserva le proprietà meccaniche del provino, si eliminano tutti i difetti della troncatura che possono rappresentare punti preferenziali di innesco per eventuali cricche, ma altresì permette di ottenere una superficie perfettamente riflettente, ideale per l'osservazione al microscopio ottico.

Per il processo di lucidatura si utilizza un disco rotante, sopra al quale vengono disposti dei fogli circolari di carta vetrata, a granulometria progressivamente più fine, secondo il seguente ordine:

- P180
- P600
- P1200
- P2400
- P4000

Durante ogni singola fase, la velocità di rotazione della macchina viene impostata a 75 giri/minuto, e per tutta l'esecuzione si irroro la superficie della carta vetrata con acqua.

Infine, per ottenere un effetto perfettamente riflettente, si rimuove il disco rotante sostituendolo con un panno rotante. In questo caso, anziché l'acqua, si utilizza una soluzione con una sospensione a base d'ossido di silicio.

Ad ogni passata si verifica che l'operazione sia stata eseguita correttamente, ossia che siano state applicate pressioni omogenee lungo tutta la superficie da trattare, andando ad osservare il provino con l'ausilio di un microscopio elettronico Leica.

8.5 Caratterizzazione morfologica e chimica del materiale

Per descrivere morfologicamente il materiale in esame, si osserva al microscopio ottico un provino con *lay-up* [+60₃/-60₃]_s. Si esaminano entrambi i *cut edge* accuratamente lucidati. Successivamente si conduce un'ulteriore analisi chimico-morfologica, con un provino avente *lay-up* [90₈], per mezzo di un microscopio elettronico a scansione (*SEM*).

8.5.1 Osservazione al microscopio ottico

Si riportano in seguito delle micrografie rappresentative.

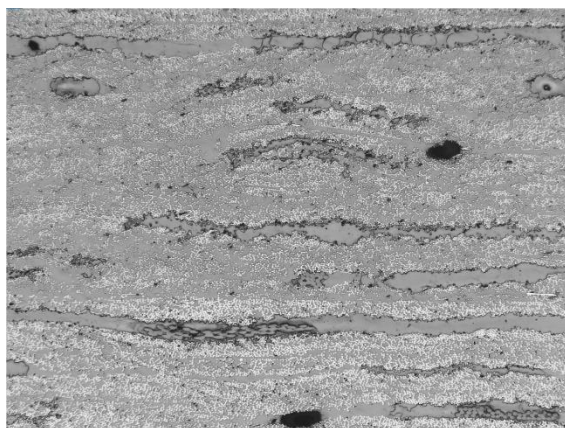


FIG.8.21 Micrografia provino [+60₃/-60₃]_s – 50x.

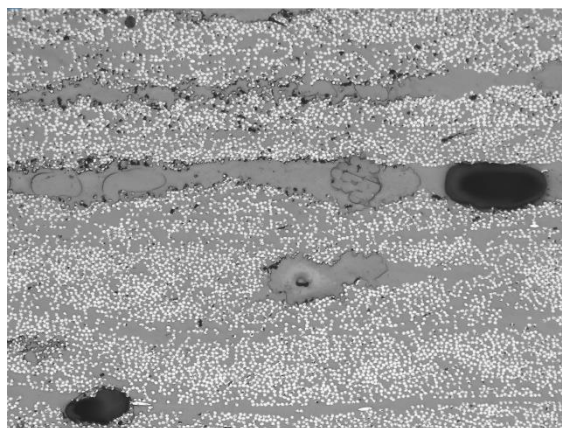


FIG.8.22 Micrografia provino [+60₃/-60₃]_s – 100x.

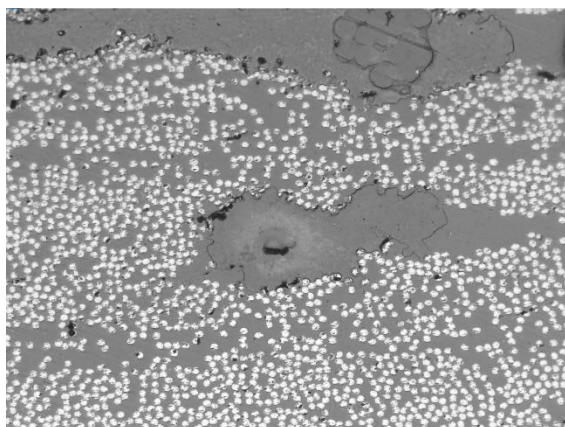


FIG.8.23 Micrografia provino [+60₃/-60₃]_s – 200x.

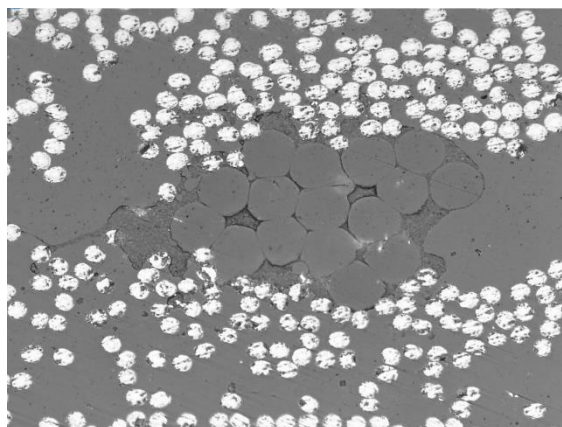


FIG.8.24 Micrografia provino [+60₃/-60₃]_s – 500x.

In generale dalle micrografie ottenute si può osservare:

- la presenza di mazzetti di fibre avente morfologia variabile (grigie), di materiale non noto e diametro maggiore rispetto alle fibre di carbonio (bianche);
- la presenza nella matrice di zone prive di fibre e a colorazione più o meno scura;
- la presenza di vuoti (neri).

Si noti inoltre, come si abbia una distribuzione di fibre di carbonio molto bassa.

Infine, considerando le zone di diversa tonalità presenti all'interno della matrice, si decide di eseguire un'analisi al Microscopio Elettronico a Scansione (*SEM*), per verificare la possibilità che queste zone siano caratterizzate da una diversa concentrazione di nanotubi.

8.5.2 Osservazione al microscopio elettronico a scansione

Inizialmente si svolgono delle spettroscopie del materiale, ponendo particolare riguardo nel confrontare composizione chimica delle fibre di carbonio con le fibre non note e delle zone della matrice a diversa tonalità. Nei diagrammi seguenti si osservi la diversa distribuzione di carbonio (primo picco) ed ossigeno (secondo picco).

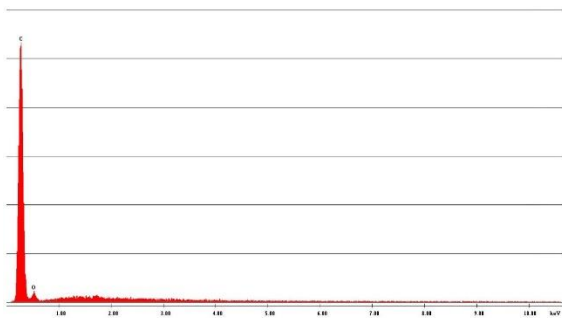


FIG.8.25 Spettroscopia delle fibre di carbonio.

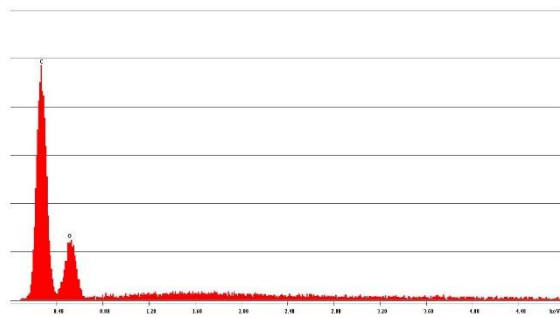


FIG.8.26 Spettroscopia delle fibre non note.

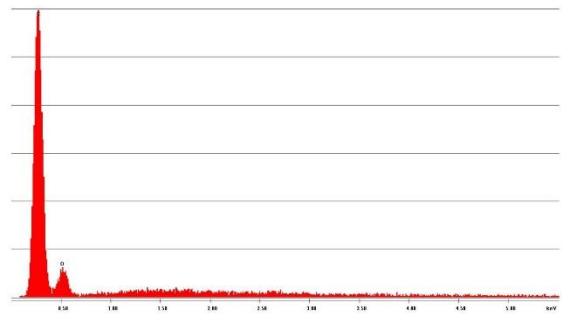


FIG.8.27 Spettroscopia della matrice con tonalità chiara.

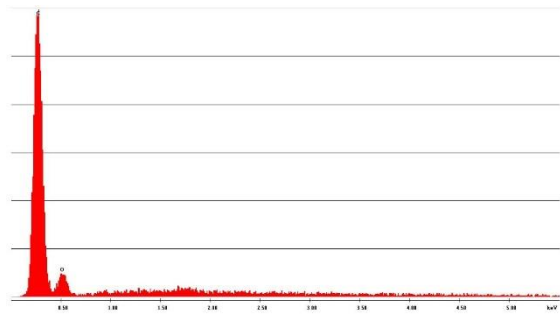


FIG.8.28 Spettroscopia della matrice con tonalità scura.

Dalla prima spettroscopia, in Figura 8.25, si noti la presenza, seppur in minima parte, di ossigeno. Trattandosi di fibre di carbonio l'unico costituente dovrebbe essere appunto il carbonio, ma avendo problemi di messa a fuoco (il provino infatti, è altamente conduttivo e questo genera una forte interferenza che si traduce con uno spostamento dello stesso durante l'osservazione), è plausibile affermare che si tratti di un'influenza della matrice circostante.

Mentre per le fibre di materiale non noto, il problema non sussiste poiché, viste le dimensioni maggiori, anche a seguito di uno spostamento del campione in fase di acquisizione dati, si riesce comunque a restare nella zona di osservazione, senza influenzare la matrice circostante. Quindi, l'elevata presenza di ossigeno sembra suggerire che si tratti di fibre di poliestere.

Infine, visti i picchi pressoché identici, analizzati nelle spettroscopie in Figura 8.27 e Figura 8.28, si prosegue con un'analisi chimica dettagliata. Definiti quindi i seguenti valori:

- E , tipo di elemento;
- Wt % , percentuale in peso dell'elemento considerato;
- At % , percentuale atomica dell'elemento considerato (numero di atomi);
- K-r , coefficiente correttivo dei picchi analizzati durante la spettrometria;
- Z , numero atomico dell'elemento, tenuto conto del corrispettivo K-r;
- A , assorbimento di energia;
- F , fluorescenza;

si calcolano tutti i parametri per le quattro zone analizzate in precedenza.

Fibre di Carbonio						
E	Wt %	At %	K-r	Z	A	F
C	91.42	93.42	0.8146	1.0014	0.8897	1.0001
O	8.58	6.58	0.0123	0.9848	0.1453	1.0000
Totale	100.00	100.00				

TAB.8.1 Analisi chimica delle fibre di carbonio.

Fibre non note						
E	Wt %	At %	K-r	Z	A	F
C	67.97	73.87	0.4611	1.0053	0.6746	1.0003
O	32.03	26.13	0.0595	0.9886	0.1879	1.0000
Totale	100.00	100.00				

TAB.8.2 Analisi chimica delle fibre non note.

Matrice a tonalità Chiara						
E	Wt %	At %	K-r	Z	A	F
C	83.06	86.72	0.6667	1.0028	0.8004	1.0001
O	16.94	13.28	0.0264	0.9862	0.1578	1.0000
Totale	100.00	100.00				

TAB.8.3 Analisi chimica della matrice a tonalità chiara.

Matrice a tonalità Scura						
E	Wt %	At %	K-r	Z	A	F
C	83.63	87.19	0.6760	1.0027	0.8061	1.0001
O	16.37	12.81	0.0253	0.9861	0.1569	1.0000
Totale	100.00	100.00				

TAB.8.4 Analisi chimica della matrice a tonalità scura.

Confrontando i valori riportati in Tabella 8.3 con i corrispettivi valori in Tabella 8.4, relativi a matrice a tonalità chiara e matrice a tonalità scura, i dati sono assolutamente equiparabili, dovrebbe trattarsi dunque del medesimo materiale, ossia resina epossidica.

Sulle superfici lucidate i nanotubi sono risultati di difficile rilevazione. Di conseguenza il provino con *lay-up* [90₈] viene portato manualmente a rottura e se ne osserva la superficie di frattura (Figura 8.29).

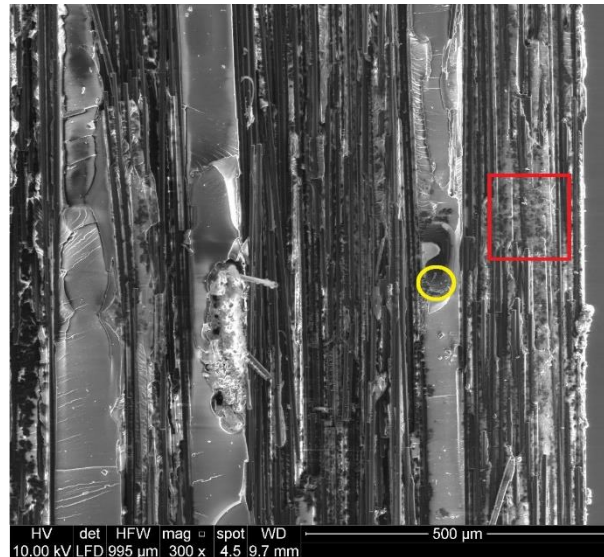


FIG.8.29 Superficie di frattura osservata al SEM.

Successivamente si sono eseguiti degli ingrandimenti progressivi nelle due zone evidenziate in Figura 8.29, la zona gialla rappresenta la porzione di spazio compreso tra due *ply* adiacenti, mentre quella rossa, la porzione di spazio all'interno di un singolo *ply*.

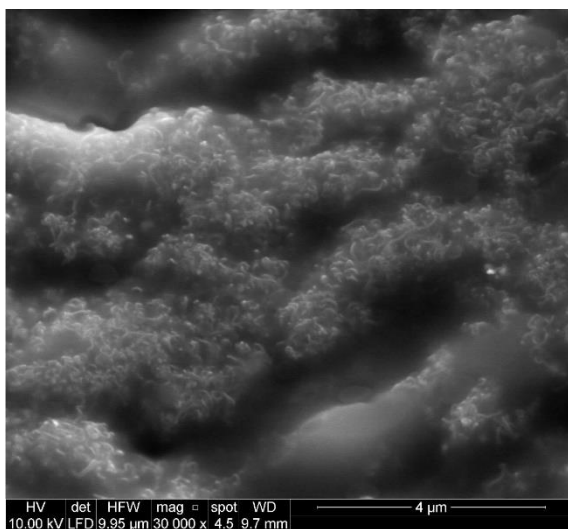


FIG.8.30 Dettaglio della regione inter-*ply* – 30000x.

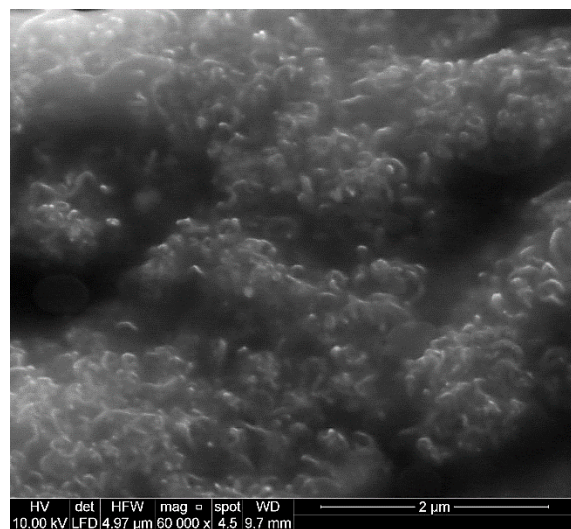


FIG.8.31 Dettaglio della regione inter-*ply* – 60000x.

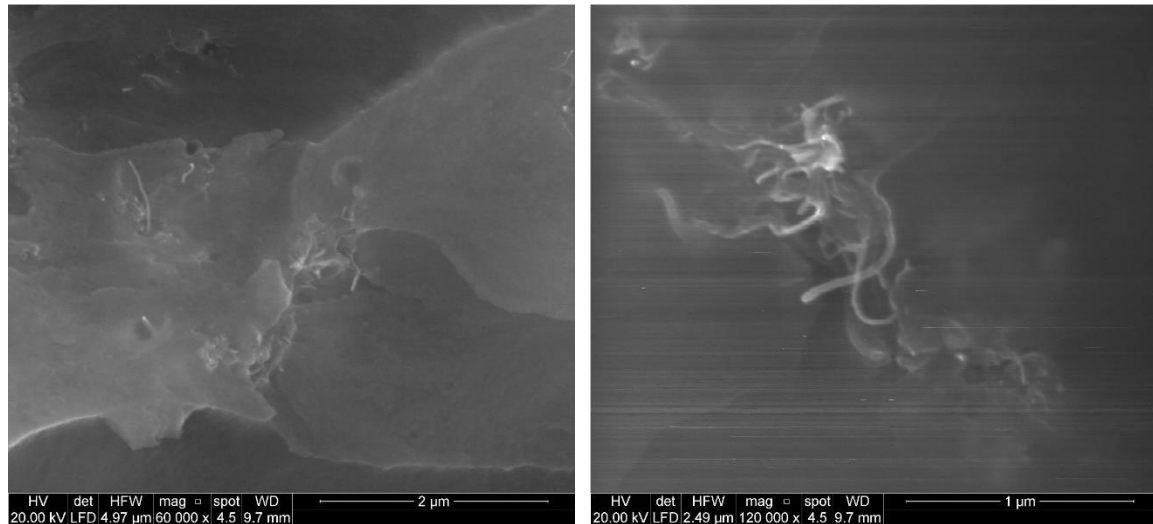


FIG.8.32 Dettaglio della regione intra-*ply* – 60000x. FIG.8.33 Dettaglio della regione intra-*ply* – 120000x.

Concludendo, da queste analisi preliminari, sembra che le regioni tra i *layer* siano più ricche di nanotubi rispetto alla matrice intra-*ply*. Sicuramente si può comunque affermare che la distribuzione di nanotubi, all'interno del materiale, non sia assolutamente omogenea.

8.6 Caratterizzazione meccanica del materiale

Per caratterizzare meccanicamente il materiale, si eseguono delle prove statiche con 6 provini UD, rispettivamente due provini aventi *lay-up* [0₈], due provini aventi *lay-up* [45₈] e due provini aventi *lay-up* [90₈]. L'obiettivo è quello di ricavarsi cinque proprietà elastiche del materiale in esame.

Si eseguono delle prove statiche a trazione con estensometro montato direttamente sul campione, come visibile in Figura 8.34. Prima di ogni test si tara opportunamente la corsa iniziale dell'estensometro. La velocità di avanzamento della cella di carico viene quindi impostata pari a 1 mm/min per i provini [0₈] e [90₈] mentre per i provini [45₈], aspettandosi un comportamento non lineare ed una zona di *softening* molto estesa, si aumenta l'avanzamento della cella di carico a 5 mm/min.

Per il monitoraggio della deformazione si decide di affidarsi ad un estensometro biassiale poiché, se si considerassero i valori equivalenti della cella di carico, si dovrebbero considerare anche le corrispettive cedevolezza assiali di tutto il sistema della macchina, i cui contributi non sono trascurabili.

Si analizzano di seguito i parametri lineari monitorati dall'estensometro, necessari per il calcolo delle deformazioni ingegneristiche, lungo la direzione del carico applicato e lungo la direzione trasversale.

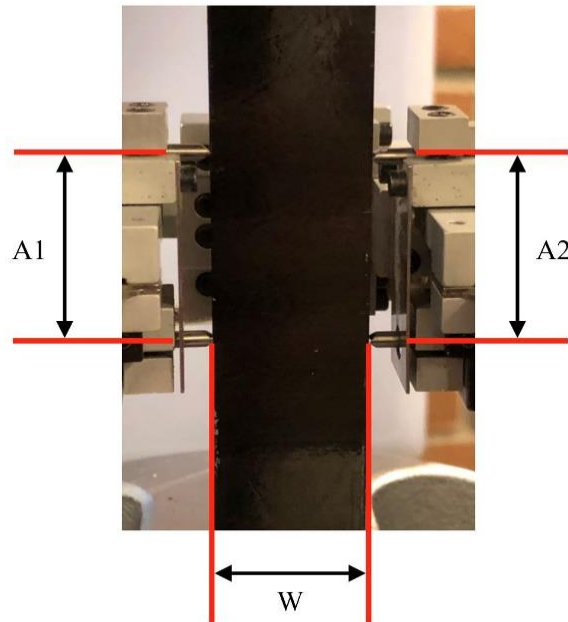


FIG.8.34 Parametri dell'estensometro biassiale.

Durante le singole rampe di carico, l'estensometro monitora in continuo la variazione lineare delle due lunghezze A_1 e A_2 , e le rapporta ai valori iniziali, restituendo così i corrispettivi valori di deformazione. Invece, per la lunghezza lineare W , monitora la sola variazione, restituendo valori positivi in caso di contrazione.

Quindi, la deformazione longitudinale complessiva, lungo la direzione di applicazione del carico, sarà pari alla media tra la deformazione ε_{A_1} e la deformazione ε_{A_2} . Mentre la deformazione trasversale, sarà pari al rapporto tra la variazione relativa alla lunghezza trasversale W e la larghezza effettiva iniziale del provino.

Noto infine il carico applicato dalla cella di carico, è possibile rapportarlo alla sezione trasversale del campione (noti larghezza e spessore iniziali) e ricavarsi dunque lo sforzo ingegneristico. Si riportano di seguito delle formule riassuntive.

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_{A_1} + \varepsilon_{A_2}}{2} \quad (8.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{-\Delta w}{W_i} \quad (8.2)$$

$$\sigma_x = \frac{N}{W_i \cdot S p_i} \quad (8.3)$$

Si procede dunque calcolandosi sforzo e deformazioni per tutte le acquisizioni della cella di carico. Quindi, si riportano successivamente:

- lo sforzo in funzione della deformazione longitudinale;
- la deformazione trasversale in funzione della deformazione longitudinale.

Nei digrammi seguenti si inseriscono direttamente i dati di acquisizione di tutti i provini aventi medesimo *lay-up*. Per ogni provino si riporta in legenda il codice equivalente, avente la dicitura “unidirezionale” e rispettivo angolo di *off-axis*, seguito dal numero del provino in esame. Si precisa infine, che per ridurre il rumore nel segnale di acquisizione dati, ogni valore ottenuto è stato successivamente mediato con i tre valori ad esso precedenti e i tre valori ad esso successivi, ottenendo dunque delle curve filtrate.

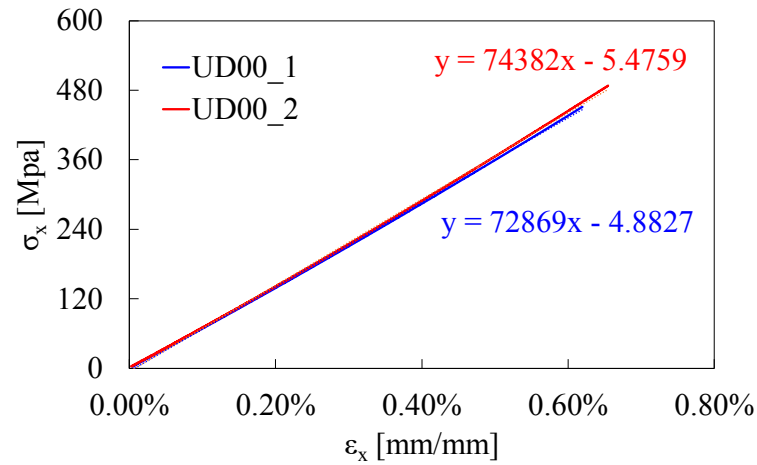


FIG.8.35 Sforzo longitudinale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 0°.

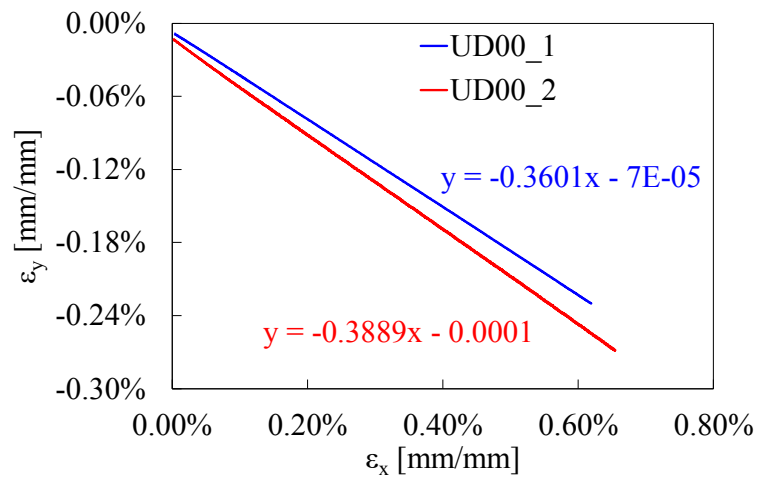


FIG.8.36 Deformazione trasversale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 0°.

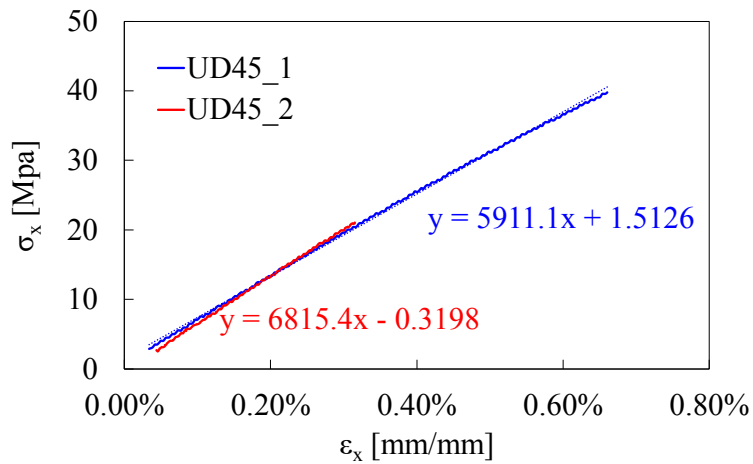


FIG.8.37 Sforzo longitudinale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 45°.

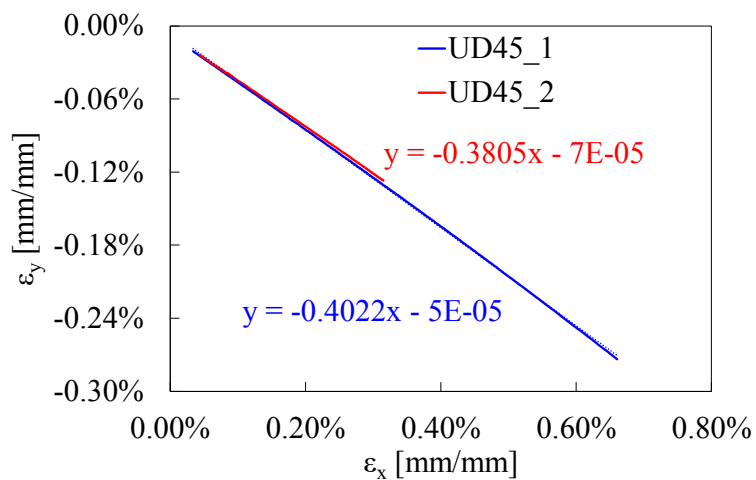


FIG.8.38 Deformazione trasversale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 45°.

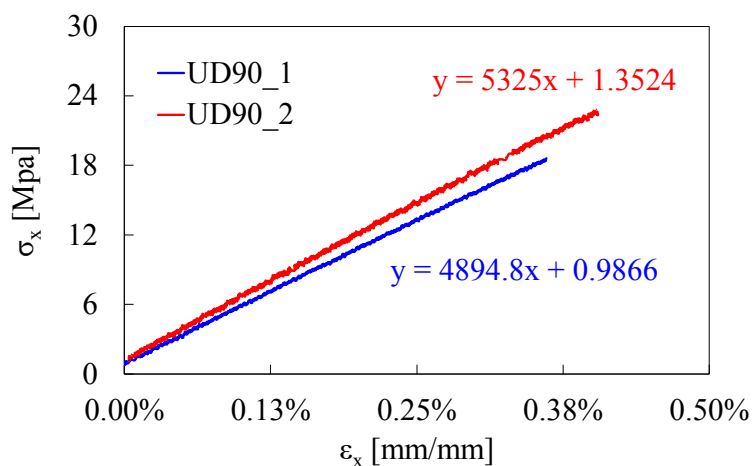


FIG.8.39 Sforzo longitudinale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 90°.

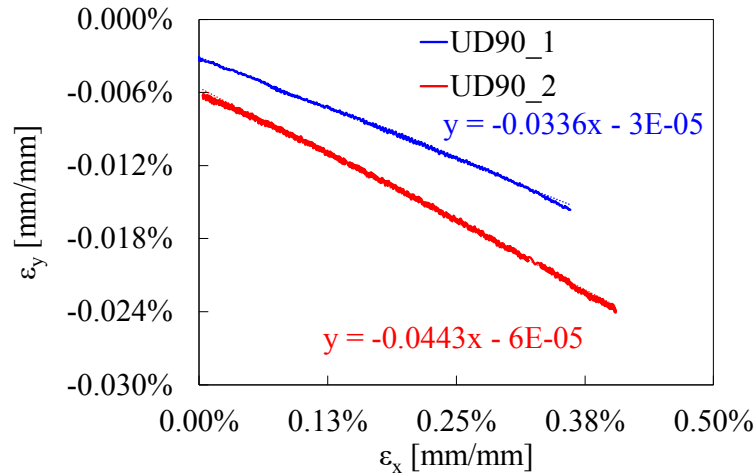


FIG.8.40 Deformazione trasversale in funzione della deformazione longitudinale per provini orientati a 90°.

Si considerino i diagrammi $\sigma_x - \epsilon_x$, in Figura 8.35, in Figura 8.37 e Figura 8.39; i coefficienti angolari delle rette d'interpolazione lineare restituiscono i corrispettivi valori dei moduli elastici, nel sistema di riferimento di struttura, E_x .

Mentre dai diagrammi $\epsilon_y - \epsilon_x$, in Figura 8.36, in Figura 8.38 e in Figura 8.40, i coefficienti angolari delle rette d'interpolazione lineare restituiscono i corrispettivi valori del coefficiente di Poisson, nel sistema di riferimento di struttura, ν_{xy} .

In Tabella 8.5 si riportano i valori ottenuti, evidenziandone la media tra le varie coppie di provini aventi medesimo angolo di orientazione delle fibre. Di fianco alle proprietà elastiche riportate, si indica tra parentesi l'angolo di *off-axis* dei provini considerati.

n° provino	$E_x (00^\circ)$ [MPa]	$E_x (45^\circ)$ [MPa]	$E_x (90^\circ)$ [MPa]
1	72869.00	5911.10	4894.80
2	74382.00	6815.40	5325.00
MEDIA	73625.50	6363.25	5109.90
n° provino	$\nu_{xy} (00^\circ)$	$\nu_{xy} (45^\circ)$	$\nu_{xy} (90^\circ)$
1	0.36010	0.40220	0.03360
2	0.38890	0.38050	0.04430
MEDIA	0.37450	0.39135	0.03895

TAB.8.5 Modulo elastico longitudinale e coefficiente di Poisson nel sistema di riferimento di struttura.

Ora, considerando gli sforzi longitudinali dei soli provini orientati a 0° e 90°, si calcolano i valori massimi registrati, riportandoli in Tabella 8.6, con i rispettivi valori medi.

n° provino	$\sigma_{x_max} (00^\circ) [MPa]$	$\sigma_{x_max} (90^\circ) [MPa]$
1	703.76	19.11
2	699.88	23.70
MEDIA	701.82	21.40

TAB.8.6 Sforzo massimo di rottura nel sistema di riferimento di struttura.

Dunque, note tutte le proprietà elastiche nel sistema di riferimento di struttura, si procede con l'estrapolare le corrispondenti proprietà nel sistema di riferimento del materiale.

In particolar modo devono valere le seguenti identità:

$$\begin{aligned}
 E_x (00^\circ) &= E_1 & E_x (90^\circ) &= E_2 \\
 \nu_{xy} (00^\circ) &= \nu_{12} & \nu_{xy} (90^\circ) &= \nu_{21} \\
 \sigma_{x_max} (00^\circ) &= \sigma_{1UTS} & \sigma_{x_max} (90^\circ) &= \sigma_{2UTS}
 \end{aligned}$$

Per il calcolo del modulo elastico tangenziale si utilizza la formulazione seguente [1]:

$$G_{12} = \left[\frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{4}{E_{45}} \right]^{-1} \quad (8.4)$$

Note dunque le proprietà elastiche del materiale, si riporta una tabella riassuntiva.

$E_1 [MPa]$	$E_2 [MPa]$	$G_{12} [MPa]$	ν_{12}	ν_{21}	$\sigma_{1UTS} [MPa]$	$\sigma_{2UTS} [MPa]$
73625.50	5109.90	2328.28	0.37450	0.03895	701.82	21.40

TAB.8.7 Proprietà Elastiche nel sistema di riferimento del materiale.

Infine, volendo stimare approssimativamente la frazione volumetrica di fibre di carbonio si utilizza la *Rule of Mixture* [1], ipotizzando come moduli elastici longitudinali, 230000 MPa per le fibre di carbonio (E_f) e 3000 MPa per la matrice epossidica (E_m).

$$E_1 = E_f \nu_f + E_m \nu_m = E_f \nu_f + E_m (1 - \nu_f) \rightarrow \nu_f = \frac{E_1 - E_m}{E_f - E_m} = 0,31 = \mathbf{31\%} \quad (8.5)$$

8.7 Caratterizzazione elettrica del materiale

Per caratterizzare elettricamente il materiale, si eseguono delle prove elettriche con tre provini UD, rispettivamente, un provino avente *lay-up* [0₈], un provino avente *lay-up* [45₈] e un provino avente *lay-up* [90₈]. Per ciascuno di essi verrà troncata un'estremità necessaria per il monitoraggio delle proprietà elettriche lungo la direzione dello spessore. L'obiettivo finale è la determinazione della conducibilità elettrica del laminato.

I provini presentano la geometria e le dimensioni nominali illustrate in Figura 8.41.

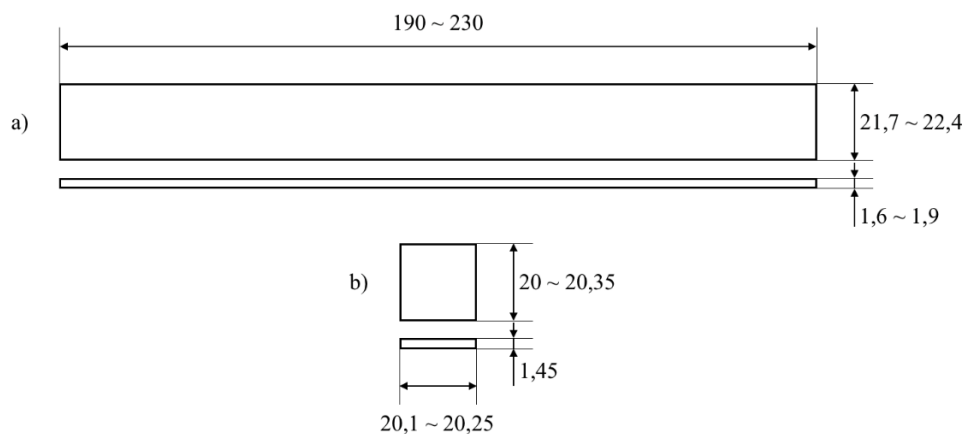


FIG.8.41 Geometria dei provini analizzati, per misure:

- a) *in-plane*;
b) *out-of-plane*.

I codici e le quantità dei campioni analizzati vengono riassunti nella seguente Tabella.

<i>CODICE</i>	<i>QUANTITA'</i>	<i>TIPO DI MISURA</i>
I.P. – 00	1	Conducibilità in-plane lungo la direzione 0°
I.P. – 45	1	Conducibilità in-plane lungo la direzione 45°
I.P. – 90	1	Conducibilità in-plane lungo la direzione 90°
O.O.P.	3	Conducibilità out-of-plane*

TAB.8.8 Codici, quantità e tipo di misure eseguite dei campioni analizzati.

* Per la misurazione della conducibilità elettrica lungo la direzione dello spessore si utilizzano le tre estremità troncate dai provini, si ripete dunque la misura sui tre diversi campioni, dimensionalmente simili, a causa della elevata dispersione abitualmente riscontrata.

Si riporta un'immagine rappresentativa dei campioni oggetto dei test.



FIG.8.42 Campioni oggetto dei test.

I test eseguiti vengono condotti sulla base di una procedura interna validata. Si sottolinea come, rispetto alla citata procedura, i campioni forniti risultino fuori standard; gli spessori infatti dovrebbero essere compresi tra i 3 mm e i 5 mm.

Per le misure di resistività si impiega un'unità SourceMeter, marca Keithley mod. 2604b, avente le seguenti caratteristiche:

- doppio canale con 80 W di potenza (40 W/canale);
- sorgente/misura a quattro quadranti con risoluzione a 6½ cifre;
- corrente max / min: 3 A in DC, 10 A per impulso / 100 fA;
- tensione max / min: 40 V / 100 nV.

La misura di resistenza elettrica viene effettuata con la tecnica a quattro punti, utilizzando un canale dello strumento per la generazione di una corrente elettrica costante e l'altro canale per la rilevazione delle cadute di potenziale lungo tratti definiti di provino. Con questa tecnica di misura è possibile ottenere un valore affidabile di resistenza elettrica eliminando il contributo della resistenza di contatto.

Prima di effettuare la misura, ciascun provino è stato opportunamente preparato:

1. *polishing* delle zone di contatto, in modo da rimuovere lo strato superficiale di resina della matrice epossidica;
2. sgrassaggio delle superfici;
3. applicazione di vernice conduttiva argentata in corrispondenza dei punti di contatto, in modo da assicurare adeguata continuità elettrica nelle zone di iniezione della corrente e di misurazione della tensione;
4. realizzazione dei contatti elettrici con conduttore flessibile multi-anima in rame, opportunamente rivestito di vernice conduttiva.

Si riporta un'illustrazione relativa alla disposizione dei contatti sui provini per misurazioni di conducibilità *in-plane* e *out-of-plane*.

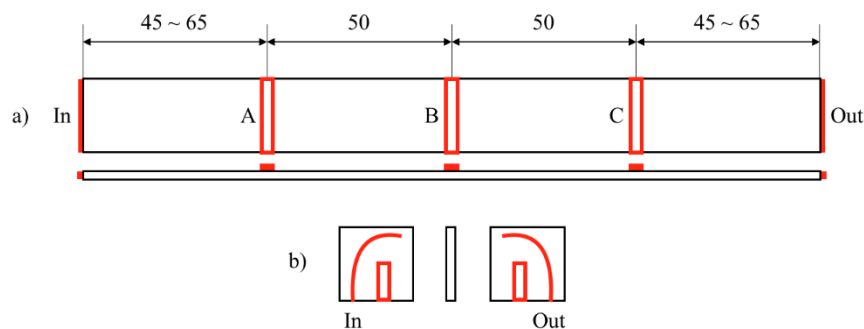


FIG.8.43 Disposizione degli elettrodi sui provini per misurazioni:

- a) *in-plane*;
- b) *out-of-plane*.

In particolare, per le misure in piano, si imposta una corrente pari a 250 mA per il provino con orientazione 00° e 10 mA per i provini con orientazione 45° e 90° . La corrente viene iniettata attraverso gli elettrodi di alimentazione di ingresso e uscita, come visibile in Figura 8.44, misurando la caduta di potenziale tra le coppie di elettrodi AB, BC ed AC.

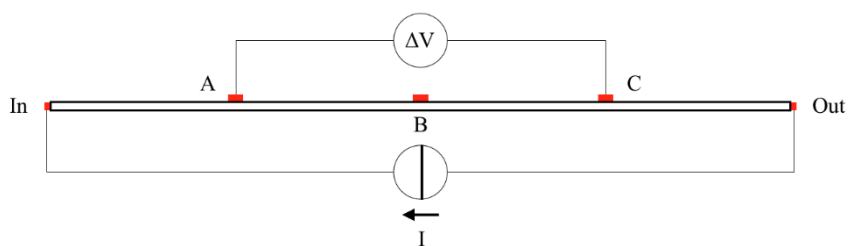


FIG.8.44 Configurazione elettrica utilizzata per le misure di conducibilità in piano.

Invece, per le misure fuori piano è stata impostata una corrente pari a 10 mA tra gli elettrodi di alimentazione, misurando la corrispettiva caduta di potenziale tra gli elettrodi di misura.

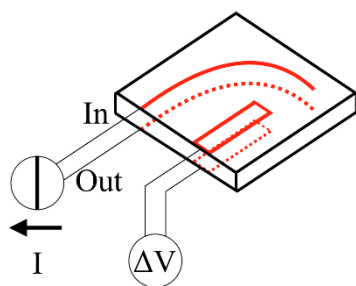


FIG.8.45 Configurazione elettrica utilizzata per le misure di conducibilità fuori piano.

Si riporta un'immagine rappresentativa di un paio di provini cablati.

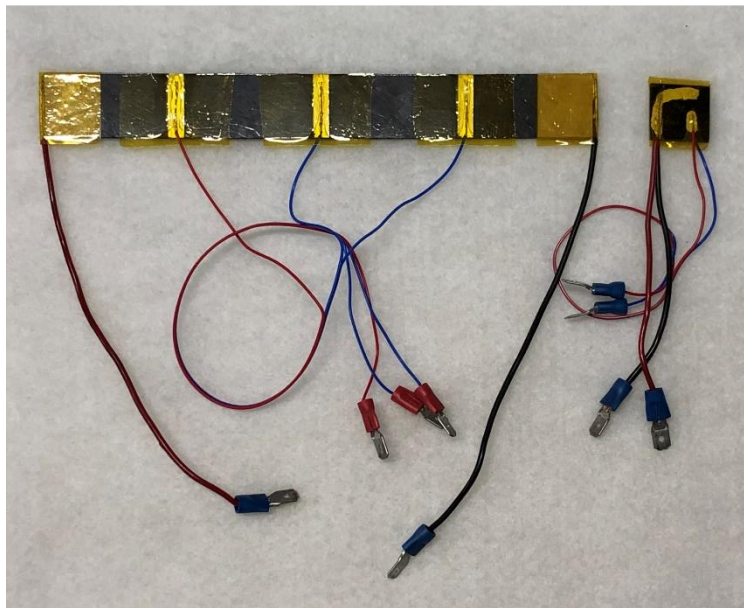


FIG.8.46 Allestimento dei provini per le misure *in-plane* e *out-of-plane*.

Una volta effettuate le misure, si procede con il computo di resistività e di conducibilità elettrica, relative a ciascun provino, utilizzando le formule seguenti:

$$\text{Resistività} \rightarrow \eta = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{d} \quad [\Omega \cdot m] \quad (8.6)$$

$$\text{Conducibilità} \rightarrow \sigma = \frac{1}{\eta} \quad [S/m] \quad (8.7)$$

Dove:

$$A = t \cdot w \quad e \quad d = d_{AB}, d_{BC}, d_{AC} \quad \text{per i provini } in\text{-plane}$$

$$A = w_1 \cdot w_2 \quad e \quad d = t \quad \text{per i provini } out\text{-of-plane}$$

Quindi, si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Codice Provino	Misurazioni Geometriche				Misurazioni Elettriche			
	t [mm]	w [mm]	d _{AB} [mm]	d _{BC} [mm]	I [mA]	ΔV _{AB} [mV]	ΔV _{BC} [mV]	ΔV _{AC} [mV]
I.P. - 00	1.9	22.35	50	50	250	16.71	17.34	34.75
I.P. - 45	1.6	22.40	50	50	10	330.17	343.40	673.23
I.P. - 90	1.6	21.70	50	50	10	922.60	932.81	1855.73

TAB.8.9 Misurazioni *In-Plane*.

Codice Provino	Resistività [$\Omega \cdot m$]			Conducibilità [S/m]		
	η_{AB}	η_{BC}	η_{AC}	σ_{AB}	σ_{BC}	σ_{AC}
I.P. - 00	5.68E-05	5.89E-05	5.90E-05	1.76E+04	1.70E+04	1.69E+04
I.P. - 45	2.37E-02	2.46E-02	2.41E-02	4.23E+01	4.06E+01	4.14E+01
I.P. - 90	6.41E-02	6.48E-02	6.44E-02	1.56E+01	1.54E+01	1.55E+01

TAB.8.10 Risultati *In-Plane*.

Codice Provino	Misurazioni Geometriche			Misurazioni Elettriche	
	t [mm]	w ₁ [mm]	w ₂ [mm]	I [mA]	ΔV [mV]
O.O.P. - 1	1.45	20.35	20.15	10	184.32
O.O.P. - 2	1.45	20.00	20.25	10	141.25
O.O.P. - 3	1.45	20.30	20.10	10	90.56

TAB.8.11 Misurazioni *Out-of-Plane*.

Codice Provino	Resistività [$\Omega \cdot m$]	Conducibilità [S/m]
	η	σ
O.O.P. - 1	5.21E+00	1.92E-01
O.O.P. - 2	3.95E+00	2.53E-01
O.O.P. - 3	2.55E+00	3.92E-01
MEDIA	3.90E+00	2.79E-01
dev.st	1.33	0.10
cov.%	34.15	36.79

TAB.8.12 Risultati *Out-of-Plane*.

Dai risultati ottenuti, si noti come, nonostante l'utilizzo dei nanotubi di carbonio, la conducibilità, valutata lungo lo spessore del laminato, resti comunque esigua se confrontata con le conducibilità del materiale in piano. Si riportano pertanto, i rapporti del valor medio di conducibilità *out-of-plane*, con i valori *in-plane* valutati per fibre orientate a 0°, 45° e 90°.

$\sigma_{x(00^\circ)} / \sigma_z$	6.07E+04
$\sigma_{x(45^\circ)} / \sigma_z$	1.48E+02
$\sigma_{x(90^\circ)} / \sigma_z$	5.56E+01

TAB.8.13 Rapporti di conducibilità elettrica *In-Plane* e *Out-of-Plane*.

8.8 Preparazione dei provini per health monitoring

Per la preparazione dei test è necessario allestire i provini realizzati con il giusto cablaggio elettrico. Di volta in volta, si definiscono nuove configurazioni e diverse geometrie, in funzione dei monitoraggi strutturali che si vogliono ottenere.

Si riporta di seguito l'iter procedurale seguito per ogni preparazione; invece, per osservare nello specifico geometrie e cablaggi, si rimanda ai capitoli successivi.

Le fasi di allestimento sono fondamentalmente le medesime descritte per la caratterizzazione elettrica del materiale.

1. Inizialmente si carteggiano le superfici, che rappresenteranno le corrispettive zone di contatto tra elettrodi e provino, in modo da rimuovere lo strato superficiale di resina della matrice epossidica. Si utilizza carta abrasiva grana 180, facendo attenzione a non asportare troppo materiale, per non ridurre troppo lo spessore del provino solo in punti localizzati, in corrispondenza dei contatti.
2. Si risciacqua il provino e successivamente si sgrassano le superfici di contatto con dell'acetone.
3. Munendosi di nastro carta, si posizionano dei lembi di scotch, lasciando scoperte le parti di campione che dovranno essere trattate. Per il posizionamento si seguono di volta in volta le corrispettive specifiche geometriche.
4. Si applica con un pennellino una vernice conduttiva argentata, in corrispondenza dei punti di contatto, in modo da assicurare adeguata continuità elettrica nelle zone di iniezione della corrente e di misurazione della tensione. Nello specifico si utilizza una boccetta di vernice marchio RS PRO, codice prodotto 186-3600.
5. Una volta asciugata la vernice, si procede con la rimozione del nastro carta e con il posizionamento degli elettrodi. Si utilizzano dei conduttori flessibili multi-anima in rame, anch'essi opportunamente rivestiti con vernice conduttiva.
6. Per finire, si rivestono le superfici trattate con del nastro kapton altamente isolante, necessario per mantenere saldamente in posizione gli elettrodi ed isolarne la superficie.

Come descritto per le misure di resistività si impiega un'unità SourceMeter. Se, oltre ad un canale di alimentazione ed un canale di misura, dovessero essere necessarie altre acquisizioni, si collega in parallelo un modulo di ingresso tensione, nello specifico si tratta di un'unità a 32 canali CompactDAQ, modello NI-9205, della National Instrument.

Si riportano di seguito alcuni esempi rappresentativi dei processi sopra descritti.



FIG.8.47 Disposizione del nastro carta sui provini per cablaggio a 4 elettrodi opposti.



FIG.8.48 Disposizione del nastro carta sui provini per cablaggio a 4 elettrodi.

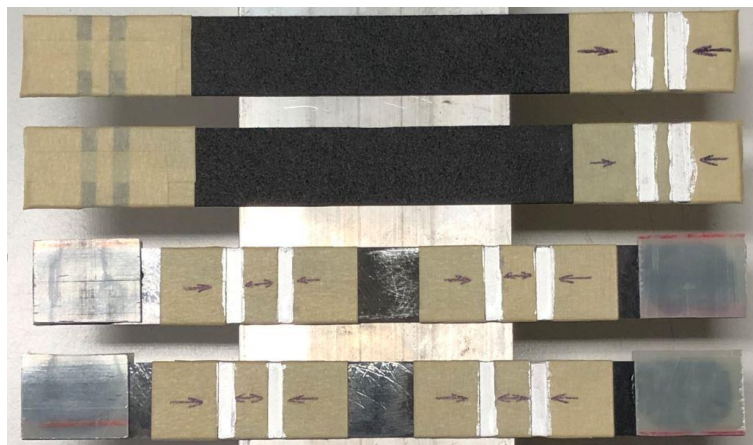


FIG.8.49 Applicazione della vernice argentata sui provini per cablaggio a 4 elettrodi opposti e 4 elettrodi.



FIG.8.50 Disposizione degli elettrodi e nastro kapton sul provino per cablaggio a 4 elettrodi opposti.



FIG.8.51 Disposizione degli elettrodi e nastro kapton sul provino per cablaggio a 4 elettrodi.

8.9 Preparazione delle tab

Per la preparazione delle *tab*, il materiale a disposizione è una bobina di *pre-preg*, materiale composito fibrorinforzato pre-impregnato, nel quale assieme alle fibre di vetro è già presente una matrice in resina epossidica. L'iter procedurale è il medesimo di quello descritto per la realizzazione dei tre laminati in fibra di carbonio, la differenza è legata all'utilizzo della fibra di vetro e il tipo di *lay-up*. Per le *tab* infatti si realizza un laminato disponendo quattro strati complessivi, dei quali due con orientazione delle fibre a 0° e due con orientazione delle fibre a 90° , al fine di ottenere un laminato $[0/90]_s$. Si riportano due immagini illustrative.



FIG.8.52 Laminato $[0/90]_s$ pre-autoclave.

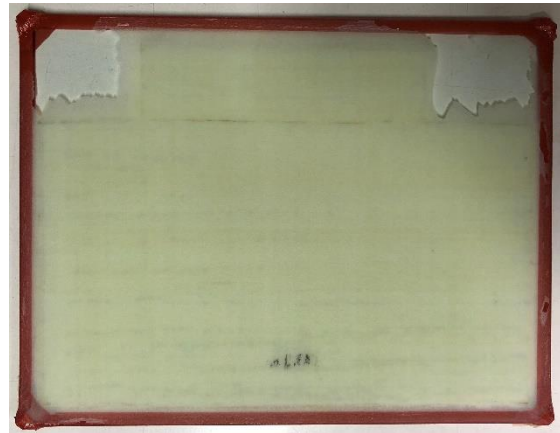


FIG.8.53 Laminato $[0/90]_s$ post-autoclave.

Infine, un'ulteriore modifica riguarda il ciclo di cura in autoclave. Complessivamente si osserva una dilazione del tempo ciclo, a discapito di una riduzione della temperatura massima, da 120°C a 100°C . Si riporta il solo digramma di cura con temperatura, pressione e vuoto in Figura 8.54.

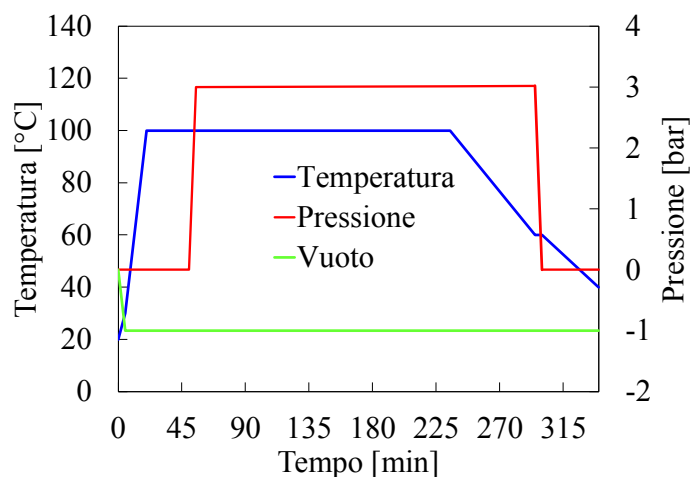


FIG.8.54 Ciclo di cura in autoclave.

Il laminato così ottenuto verrà tagliato al fine di ottenere una serie di *tab* dalle dimensioni di 25 mm per 30 mm.

8.10 Referenze

- [1] Marino Quaresimin, *Introduzione alla progettazione con i materiali compositi*, 2009, p.24-31.

HEALTH MONITORING SU PROVINI SIMMETRICI

[+60₃/-60₃]_s

9.1 Introduzione

Nel seguente capitolo verranno analizzate diverse prove sperimentali di *Health Monitoring* secondo varie modalità di carico e di configurazione degli elettrodi. I provini testati hanno un *lay-up* [+60₃/-60₃]_s.

Per ogni test si riportano i parametri principali di esecuzione e di misura, in particolare, di volta in volta, si procede preliminarmente con il calcolo della resistenza di contatto secondo quanto segue.

Dalla la legge di Ohm $R = \eta \cdot l/A$, ne deriva che $\eta = R_m \cdot A/l_m$, dove con R_m ed l_m , si indicano resistenza e distanza relative agli elettrodi di misura. Si calcola quindi la resistività del campione considerando ogni volta reale sezione del provino e distanze degli elettrodi considerati. Successivamente, nota la distanza degli elettrodi di alimentazione (l_A), si calcola la resistenza che si dovrebbe misurare (R_A^*) data la resistività calcolata precedentemente e la si confronta con la resistenza effettivamente misurata (R_A). La differenza tra i due contributi esprime la quota parte di resistenza relativa al contatto filo-elettrodo-provino, definita appunto resistenza di contatto (R_C).

$$R_A^* = \eta \cdot l_A/A \quad (9.1)$$

$$R_C = R_A - R_A^* \quad (9.2)$$

$$\Delta_{R_C} [\%] = \frac{R_C}{R_A^*} \cdot 100 \quad (9.3)$$

Infine, si sottolinea che i parametri geometrici, quali spessore e larghezza del provino, sono la media di cinque misurazioni eseguite sul campione post preparazione prova, poiché sia le superfici degli elettrodi preparate con carta abrasiva grana 180, sia i *cut edge* eventualmente lucidati, conferiscono una riduzione rispettivamente di spessore e larghezza, inficiando sul valore reale dell'area della sezione resistente media, durante l'esecuzione dei test.

9.2 Prova statica a trazione con cablaggio a 10 elettrodi

Come prima analisi si conduce una prova statica di trazione in *Controllo Spostamento*, fino a completa rottura del provino. Il campione è stato cablato secondo una configurazione a dieci elettrodi, rispettivamente due elettrodi di alimentazione posizionati alle estremità e otto elettrodi di misura; di seguito è possibile osservarne geometria e configurazione.

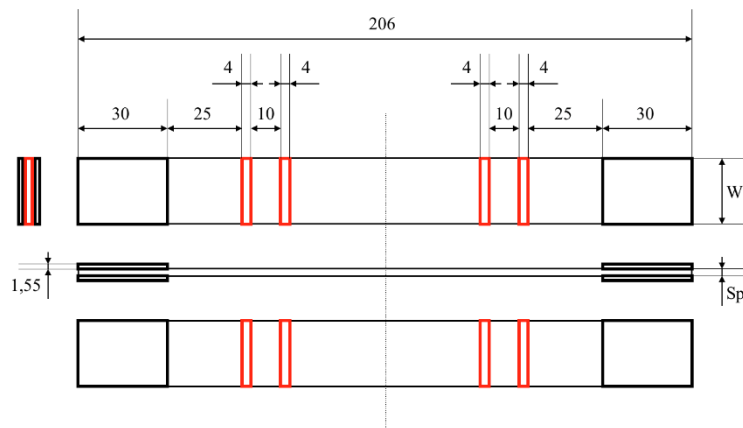


FIG.9.1 Configurazione a 10 Elettrodi – Geometria.

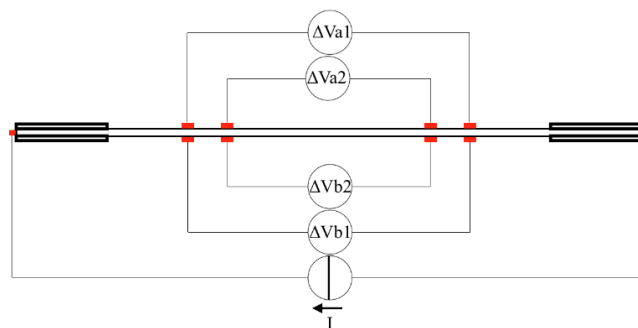


FIG.9.2 Configurazione a 10 Elettrodi - Collegamenti Elettrici.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 21,394$ mm, $Sp = 2,308$ mm;
- configurazione a 10 Elettrodi;
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 6,38 %;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz;
- avanzamento della cella di carico:
 - 0,016 mm/s prima salita;
 - 0,012 mm/s secondo mini-salita;
 - 0,012 mm/s terza mini-salita;
 - 0,020 mm/s quarta salita.

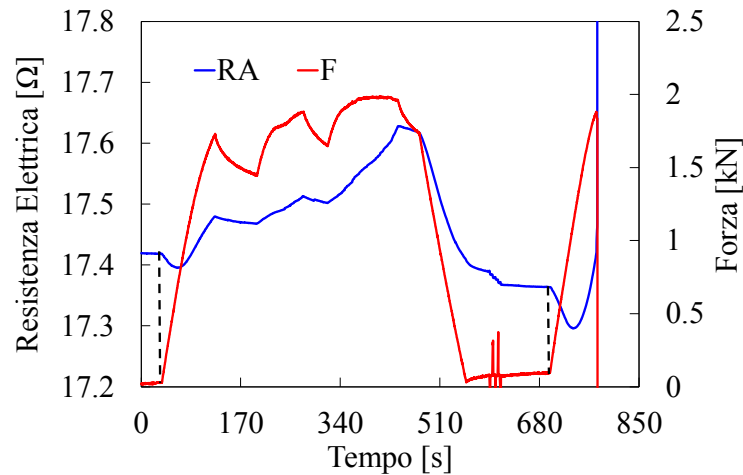


FIG.9.3 Resistenza elettrica, in corrispondenza dei contatti di alimentazione, e forza di applicazione in funzione del tempo.

Si sottolinea che il carico non è lineare poiché vi sono stati dei blocchi e degli stop macchina necessari per osservare visivamente il provino. Si riportano i risultati relativi alla resistenza valutata in corrispondenza degli elettrodi di alimentazione posizionati sulle code del provino (RA), in tale posizione gli elettrodi non risentono di tensioni superficiali trovandosi al di fuori della zona di carico ma la resistenza elettrica ingloba comunque una quota parte relativa alla resistenza di contatto pari al 6,38 %. Invece, le quattro letture relative alla caduta di potenziale sulle due superfici del provino risultano molto disturbate e non verranno pertanto considerate, semplificando il monitoraggio secondo metodologia a due elettrodi.

È possibile osservare come, durante le due fasi di carico, vi sia un primo tratto in cui la resistenza cala e un secondo tratto in cui aumenta, situazione sottolineata dai tratti verticali di colore nero.

Infine, si giunge a cedimento del campione a 40 MPa (1986 N). Nonostante ci si possa spiegare il trend complessivamente positivo per un presunto effetto piezoresistivo del materiale, si nota che durante la fase di scarico necessaria all'osservazione del provino (intorno ai 680 s), il valore nominale della resistenza elettrica sia calato rispetto al corrispettivo valore di inizio prova. La caduta registrata è pari allo 0,31 %.

Per finire, si analizza il provino al microscopio ottico e in totale le cricche osservate per tutta la lunghezza del provino sono due.

9.3 Prova ciclica a trazione con cablaggio a 10 elettrodi

Visti i risultati della prima prova si decide di provare con un test a fatica utilizzando un altro provino cablato nel medesimo modo, ossia con dieci elettrodi. Si esegue la prova in *Controllo Forza* fino a completa rottura del provino.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,088$ mm, $S_p = 2,276$ mm;
- configurazione a 10 Elettrodi;
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 3,75 %;
- $F_{max} = 1400$ N;
- $F_{media} = 700$ N;
- $F_{min} = 0$ N;
- frequenza di carico = 5 Hz;
- acquisizione segnali ogni 100 cicli. Ogni 100 cicli la cella di carico si interrompe ed esegue una rampa di carico in 6 s fino a raggiungere la forza massima impostata, durante la quale registra misure elettriche e misure meccaniche con una frequenza di aggiornamento pari a 5 Hz.

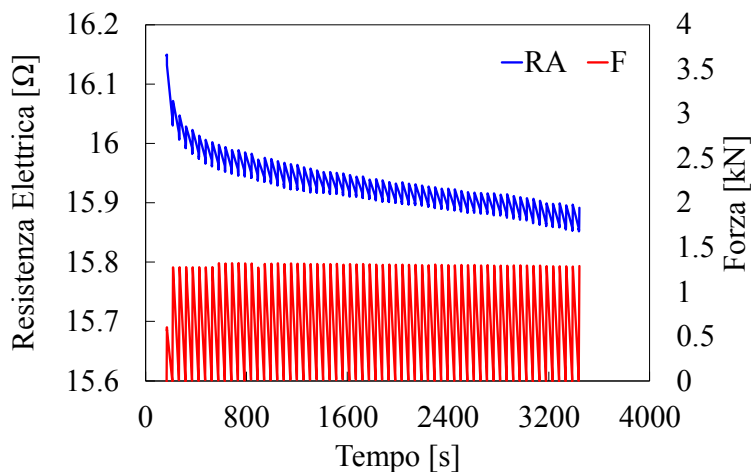


FIG.9.4 Resistenza elettrica, in corrispondenza dei contatti di alimentazione, e forza di applicazione in funzione del tempo, per tutta la storia di carico.

La prima acquisizione al ciclo 0 avviene per una forza media pari a 700 N. Le successive acquisizioni ad intervalli di 100 cicli invece, raggiungono la forza massima impostata, pari a 1400 N. Si noti come per tutte le rampe di acquisizione la forza sia inferiore al parametro impostato, errore della macchina.

Anche in questo caso le misure elettriche più affidabili, poiché prive di disturbo, sono quelle in corrispondenza degli elettrodi di alimentazione. Pertanto, si utilizzeranno solamente quest' ultime, consapevoli che la resistenza misurata è influenzata per un 3,75 % da una resistenza di contatto. Nel complesso il trend descrive un andamento monotono decrescente. Analizzando i dati durante una singola acquisizione di carico, si denota sempre una prima fase di calo della resistenza elettrica, ed una successiva fase di salita.

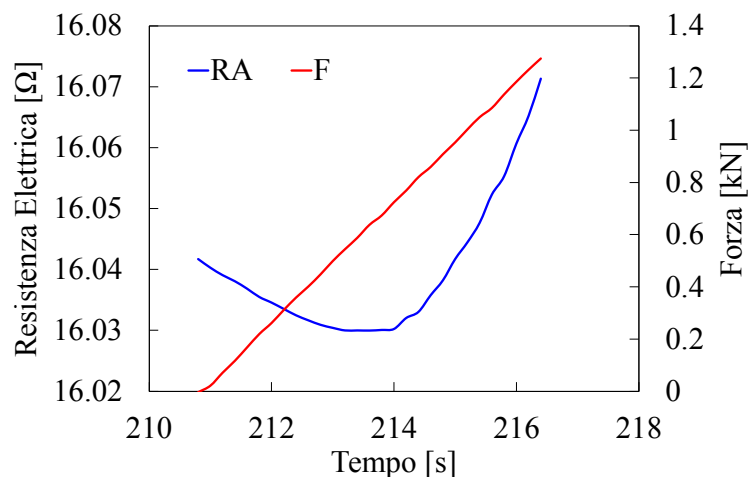


FIG.9.5 Resistenza elettrica, in corrispondenza dei contatti di alimentazione, e forza di applicazione in funzione del tempo, valutate dopo 100 cicli.

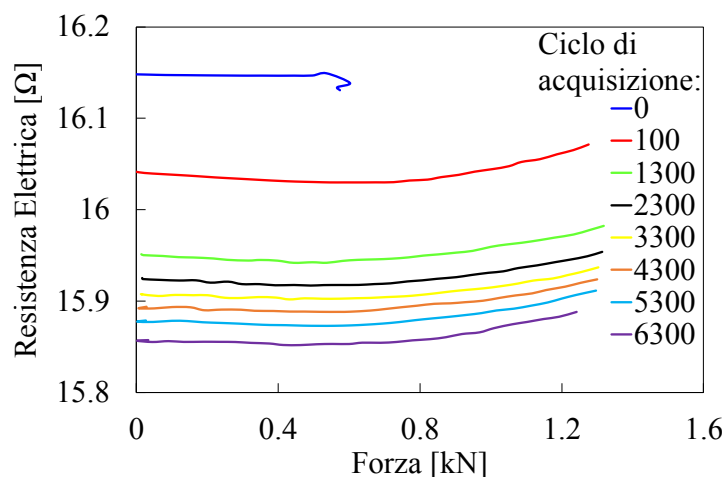


FIG.9.6 Resistenza elettrica, in corrispondenza dei contatti di alimentazione, in funzione della forza applicata, valutata a diverse acquisizioni.

Il primo grande salto avviene tra il ciclo zero e il ciclo centesimo; non si hanno però informazioni nel corso di questi 100 cicli. Si ricorda che la prova si conclude con la rottura del provino, per cui un minimo danneggiamento deve esserci stato, a maggior ragione se si osservano le curve sforzo deformazione, in particolare come queste si spostino progressivamente verso destra.

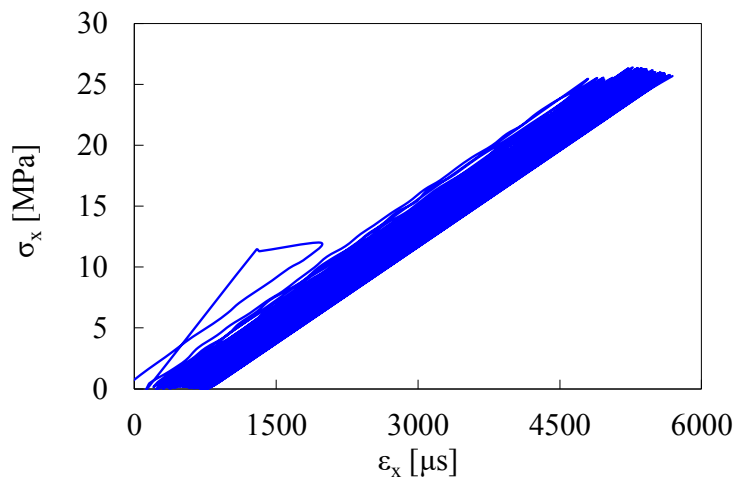


FIG.9.7 Curve ingegneristiche, sforzo in funzione della deformazione longitudinale, per tutta la storia di carico.

Inoltre, al microscopio ottico si sono osservati entrambi i *cut edge*. Le cricche presenti totali sono circa una trentina. Il danneggiamento si presenta nella maggior parte dei casi come un susseguirsi di cricche e delaminazioni. Mentre, la zona di rottura presenta una frattura completa del *ply* a -60° e delaminazioni con i rispettivi *ply* a $+60^\circ$.

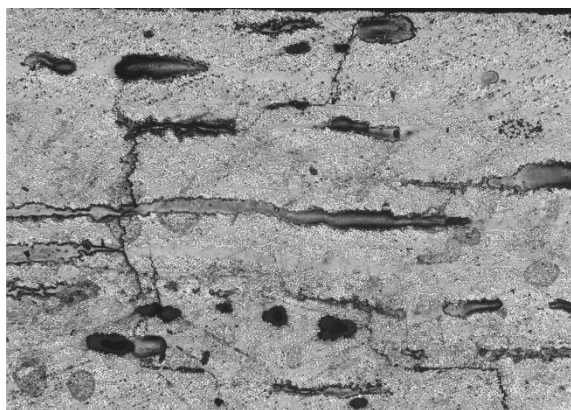


FIG.9.8 Micrografia 50x: esempio di cricche e delaminazioni osservate.

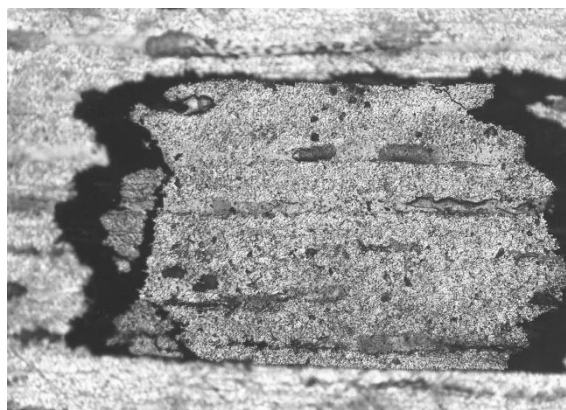


FIG.9.9 Micrografia 50x: zona di rottura.

Nonostante il danneggiamento considerevole, si registra un calo complessivo della resistenza elettrica nella condizione di scarico (inizio rampa) dell'1,80 % e nella condizione di carico (fine rampa) dell'1,48 %. Si sottolinea come i dati appena riportati si riferiscano a qualche secondo prima della rottura del provino, avvenuta dopo l'ultimo ciclo registrato ossia il 6300 e prima della successiva acquisizione dati durante il ciclo 6400. Tra un'acquisizione e l'altra intercorrono 46,2 s.

9.4 Rampe di carico a trazione con cablaggio a 4 elettrodi

Visti i trend della resistenza elettrica delle due prove precedenti, si decide di eseguire delle rampe di carico. La prova condotta avviene in *Controllo Spostamento*. Per ogni rampa di carico si monitora la forza massima applicata dalla macchina, con la consapevolezza che il cedimento del provino, valutato mediante il primo test, avviene per un valore pari a 1986N. A differenza delle prove precedenti si posizionano gli elettrodi su una sola faccia del campione e non lo si alimenta più dalle code ma dai due elettrodi esterni dei quattro complessivi. Gli elettrodi interni serviranno per monitorare la caduta di potenziale.

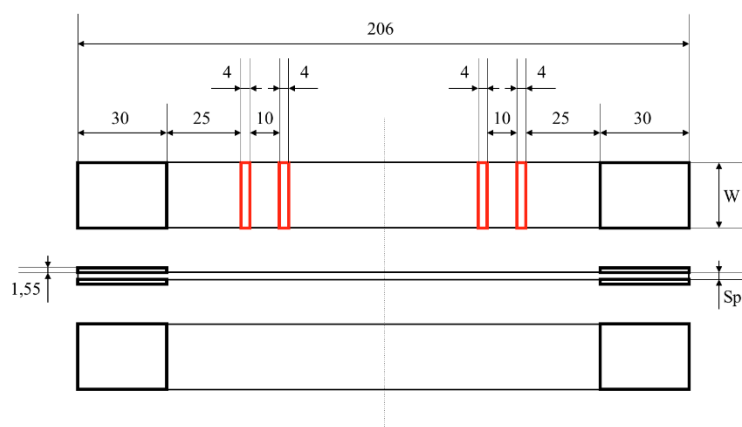


FIG.9.10 Configurazione a 4 Elettrodi – Geometria.

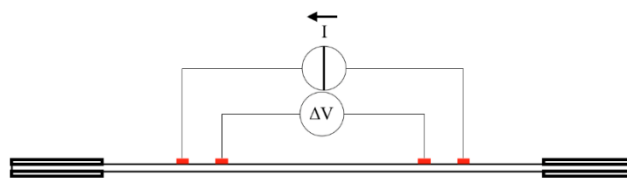


FIG.9.11 Configurazione a 4 Elettrodi - Collegamenti Elettrici.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 21,732$ mm, $Sp = 2,310$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi;
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 40,70 %;
- velocità di avanzamento = 2,00 mm/min;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

Durante la prova si eseguono complessivamente 4 rampe di carico per un valore progressivamente pari a 1000 N, 1500 N, 2000 N, 2200 N.

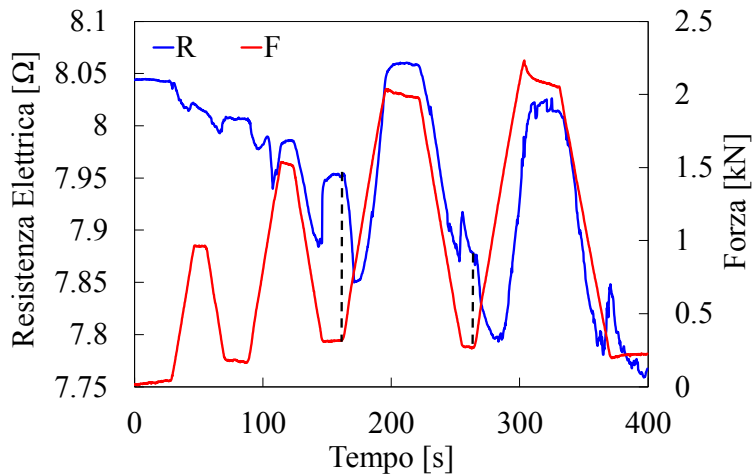


FIG.9.12 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo.

Ancora una volta l'andamento della resistenza elettrica risulta essere complessivamente negativo, la riduzione totale registrata è del 3,44 %. Anche in questo caso si denota un comportamento simile con le prove precedenti, analizzando infatti le zone tratteggiate in nero, nella terza e quarta rampa di carico, si vede una riduzione della resistenza elettrica durante la prima fase di carico e un successivo aumento per tutta la restante parte.

Per quanto riguarda il danneggiamento, dal grafico in Figura 9.13 si nota un leggero spostamento della curva sforzo-deformazione.

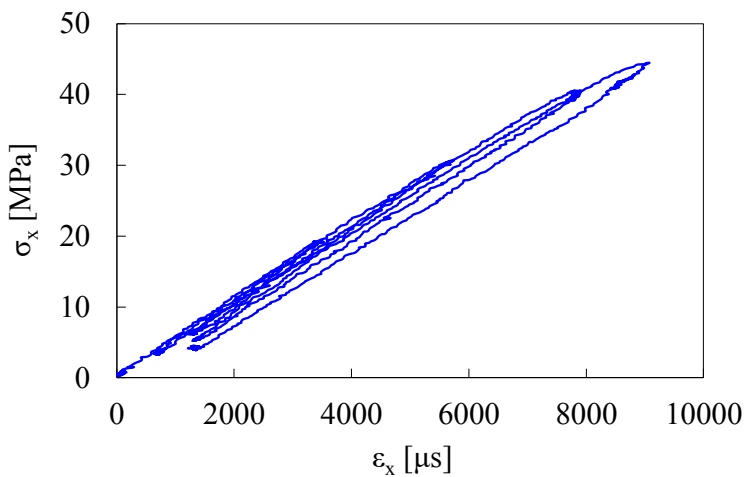


FIG.9.13 Curve ingegneristiche, sforzo in funzione della deformazione longitudinale.

Inoltre, si ipotizza un imminente cedimento del provino considerando, in prima parte i rumori percepiti durante le ultime due rampe di carico e, in seconda battuta, considerando che si è superato il carico di cedimento previsto dalla prima prova di oltre 200 N. Si decide quindi di interrompere il test per poter analizzare il provino al microscopio ottico.

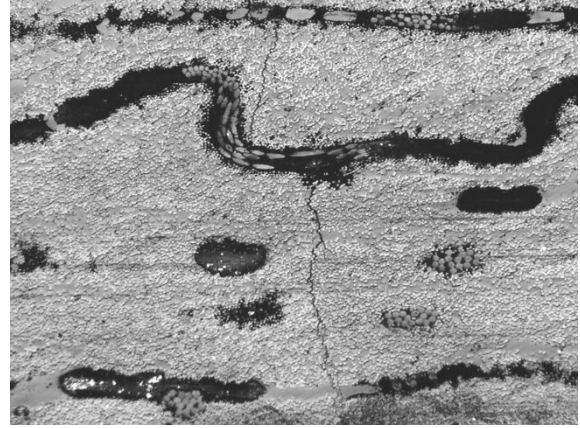


FIG.9.14 Micrografia 100x: prima cricca esaminata. FIG.9.15 Micrografia 50x: seconda cricca esaminata.

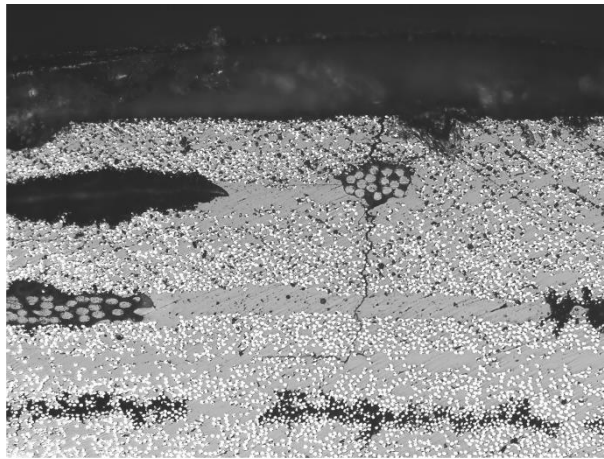


FIG.9.16 Micrografia 100x: terza cricca esaminata.

Complessivamente si osservano tre cricche posizionate nella zona intermedia ai due elettrodi interni.

Poiché con la seconda prova non si è ottenuto un trend positivo nemmeno con la presenza di una trentina di cricche e delaminazioni non si cercherà di danneggiare ulteriormente il provino anche perché, visti i carichi raggiunti, ci si aspetta un cedimento immediato.

9.5 Prova ciclica a flessione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. A]

Per il seguente test si decide di eseguire una prova a flessione a tre punti; la distanza tra i due appoggi sottostanti è pari a 52 mm e la spinta viene eseguita dal centro. Supponendo una maggiore sensibilità al problema, cercando di forzare la corrente ad attraversare lo spessore del provino, si modifica il posizionamento degli elettrodi, collocando una coppia di elettrodi di alimentazione e misura su una faccia del campione e l'altra coppia sulla faccia opposta.

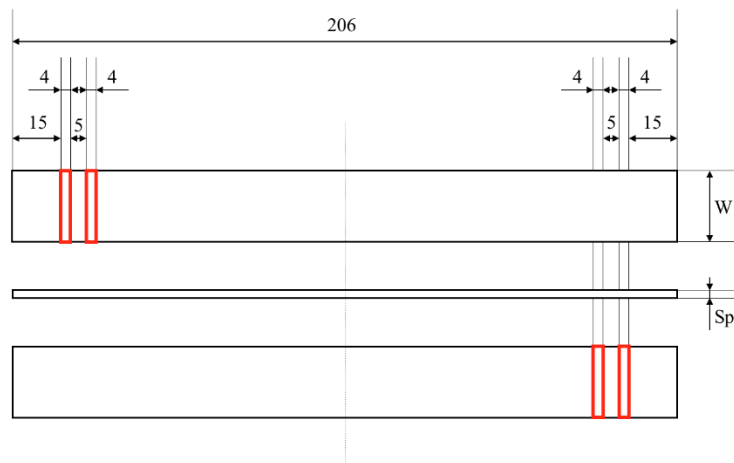


FIG.9.17 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A) – Geometria.

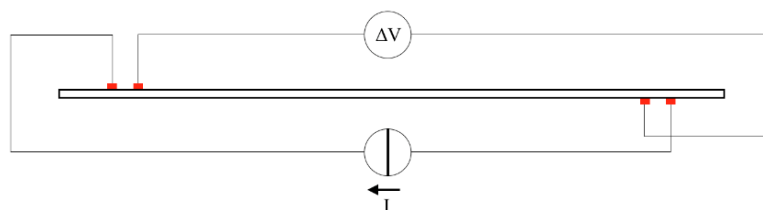


FIG.9.18 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A) - Collegamenti Elettrici.

Si esegue una prova in *Controllo Spostamento*. Si scende, pertanto, di una quota massima oltre la quale la cella di carico non può andare, se si impostasse un controllo forza, quando il provino si danneggia, eserciterebbe una resistenza flessionale inferiore e quindi dovendo garantire la medesima forza applicata, la quota in spostamento sarebbe maggiore, rischiando la rottura completa del provino stesso.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,650$ mm, $Sp = 2,310$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A);
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 8,94 %;
- $\eta_{\max} = 1,1/2,2$ mm;
- $\eta_{\min} = 0,1/0,2$ mm (precarico applicato al provino per mantenerlo in sede, non è ancorato agli appoggi);
- frequenza di carico = 5 Hz;
- acquisizione segnali ogni 200 cicli. Ogni 200 cicli la cella di carico si interrompe ed esegue una rampa di carico in 6 s fino a raggiungere la freccia massima impostata, durante la quale registra misure elettriche e misure meccaniche con una frequenza di aggiornamento pari a 5 Hz.

Con un test a flessione eventuali effetti piezoresistivi, o comunque legati all'allungamento delle fibre, non sono facilmente intuibili poiché, al di sotto dell'asse neutro, la condizione di carico è di trazione mentre, al di sopra dell'asse neutro, la condizione di carico è di compressione, ma i risultati dipendono dal reale percorso che la corrente segue nell'attraversare lo spessore del provino. Se idealmente restasse sul *ply* superiore (zona in compressione) per tutta la distanza degli elettrodi di alimentazione, per poi attraversare il provino solo alla fine, probabilmente si troverebbe un *gage factor* negativo. Soluzione plausibile considerando che la lunghezza curvilinea dalla parte delle fibre compresse è inferiore rispetto a quella dalla parte delle fibre tese. Alternativamente, se dovesse saltare subito sul *ply* inferiore, zona in trazione, il *gage factor* sarebbe sicuramente positivo. Non potendo, né prevedere, né analizzare il reale percorso della corrente, ci si aspetta una situazione intermedia.

Inizialmente si imposta una freccia minima di 0,1 mm e si scende di 1 mm, quindi fino ad un valore massimo di 1,1 mm, successivamente, notando che, durante la fase di scarico il provino si muove, si incrementa il precarico nella condizione di scarico aumentando la freccia minima a 0,2 mm. Non constatando danneggiamenti, si incrementa anche la freccia massima fino ad un valore di 2,2 mm.

Nel complesso la resistenza descrive un andamento monotono decrescente, registrando un calo complessivo nella condizione di scarico (inizio rampa) dello 0,44 % e nella condizione di carico (fine rampa) dello 0,35 %.

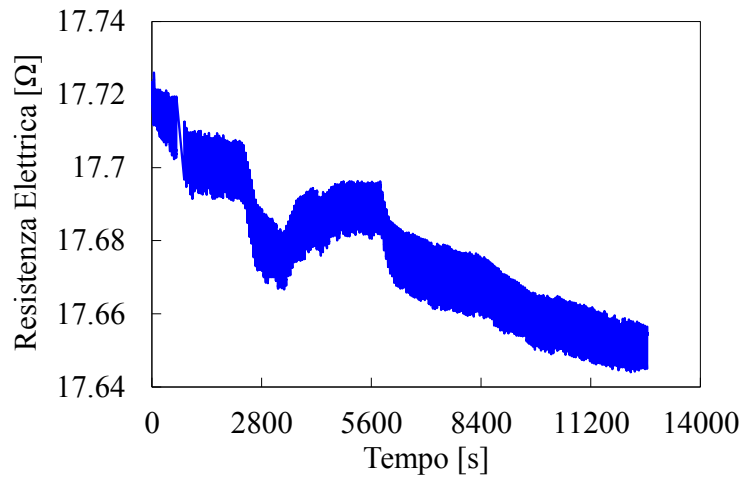


FIG.9.19 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo, per tutta la storia di carico.

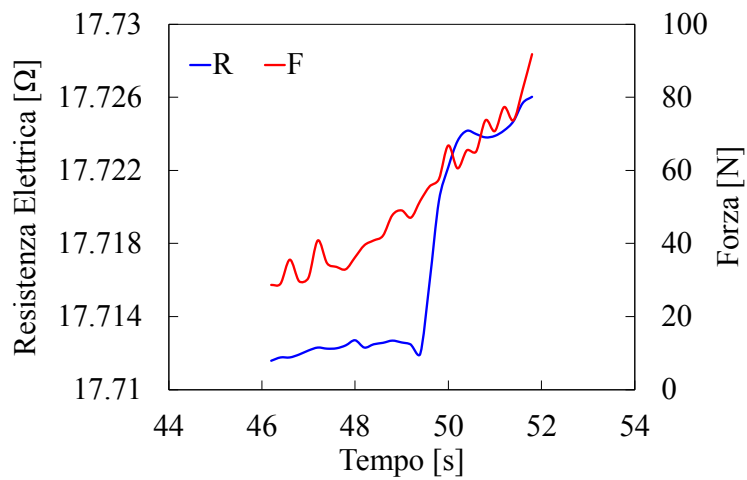


FIG.9.20 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo, valutate dopo 200 cicli.

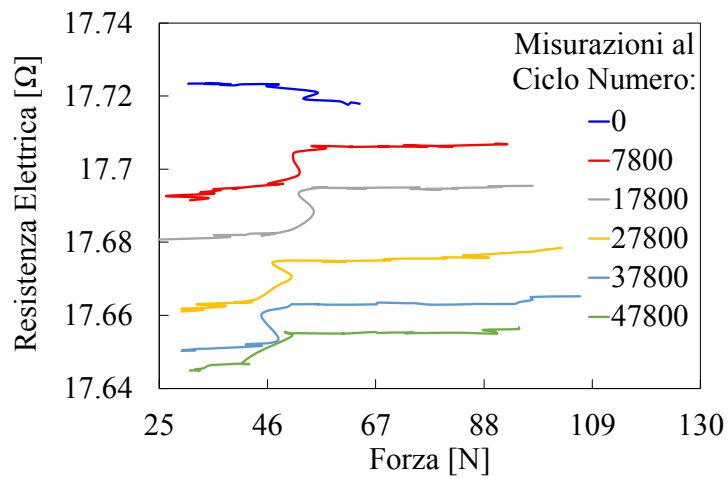


FIG.9.21 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata, valutata a diverse acquisizioni.

Si osservi come la resistenza elettrica, durante una singola rampa di carico, inizialmente non subisca variazioni significative per poi salire repentinamente, fino alla massima forza applicata. Si registra tale comportamento per ogni rampa di carico, fatta eccezione per la prima acquisizione. Si interrompe la prova al ciclo numero 48000 e si osserva il provino al microscopio ottico. Il danneggiamento consta solamente di un paio di cricche che interessano la zona al di sotto dell'asse neutro, relativa cioè alle fibre tese. Nella parte in compressione non si denotano danneggiamenti visibili. Pertanto, si cercherà di danneggiare ulteriormente il provino.

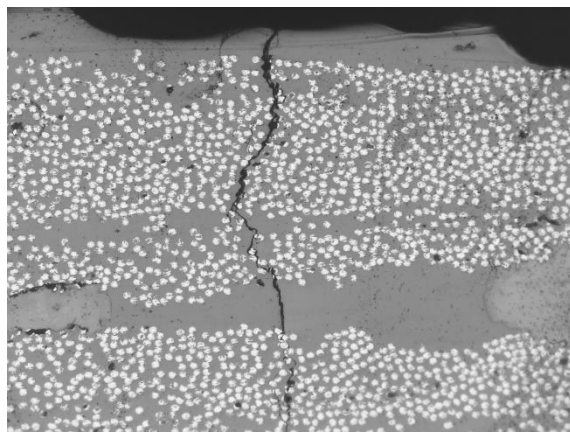


FIG.9.22 Micrografia 200x.

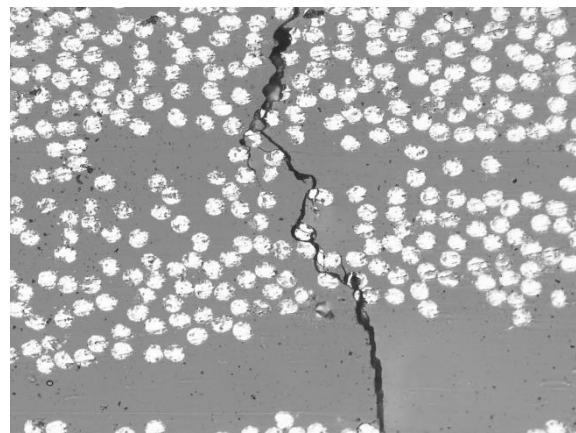


FIG.9.23 Micrografia 500x.

9.6 Rampe di carico a flessione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. A]

Si utilizza il provino della prova precedente (Paragrafo 9.5) ma, poiché dall'analisi dei trend delle resistenze elettriche, la deriva è complessivamente negativa, non aspettandosi dei risultati diversi neppure con micro-danneggiamenti più consistenti, si decide di eseguire delle rampe di carico sempre mediante una prova a flessione a tre punti. L'obiettivo è quello di ottenere dei macro-danneggiamenti in termini di delaminazioni delle singole lamine. Si esegue la prova in *Controllo Spostamento*.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,650$ mm, $Sp = 2,310$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A);
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 9,12 %;
- velocità di avanzamento = 0,25 mm/s;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

Si hanno complessivamente cinque rampe di carico in ordine crescente di spostamento, in termini di freccia verticale. Ad ogni rampa successiva corrisponderà dunque una deformata a flessione più marcata.

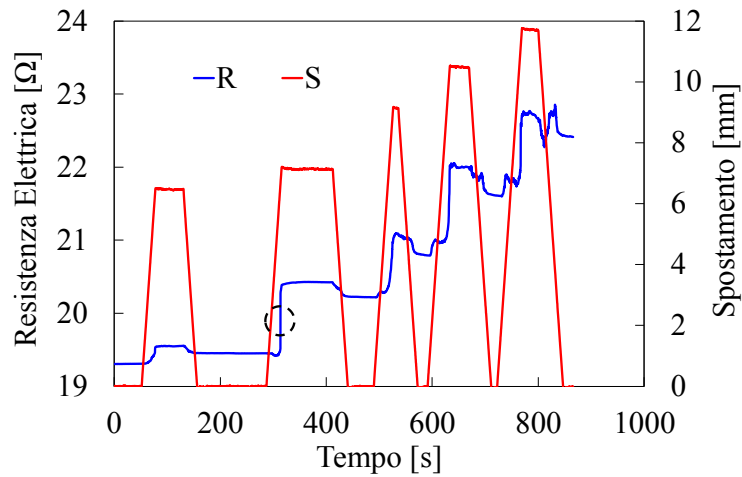


FIG.9.24 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo.

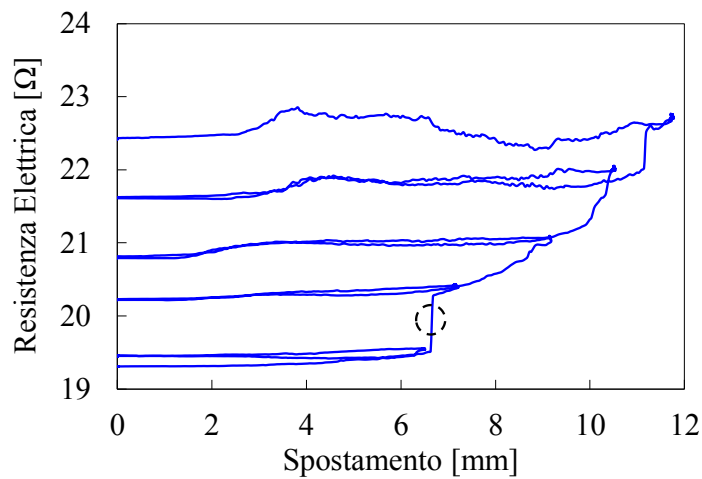


FIG.9.25 Resistenza elettrica in funzione dello spostamento.

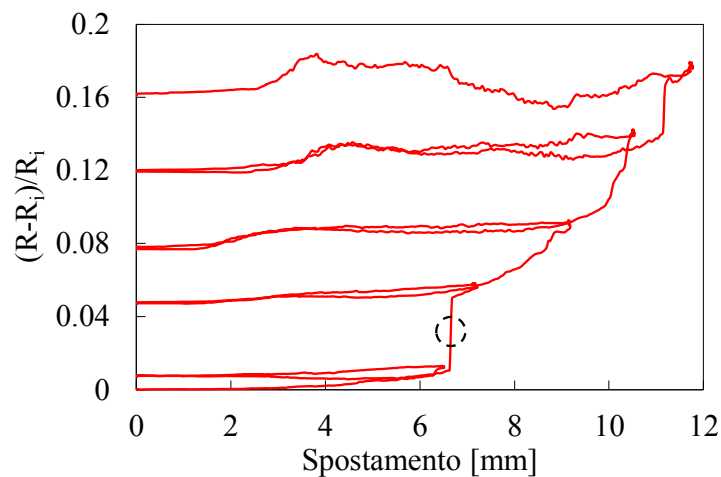


FIG.9.26 Incremento di resistenza elettrica in funzione dello spostamento.

Si sottolinea che, per l'incremento percentuale della resistenza elettrica, si pone come valore di riferimento quello di inizio prova, e non il valore allo stato non danneggiato, all'inizio della prova precedente.

Nella prima rampa non si percepiscono visivamente macro-danneggiamenti, nonostante in condizioni di riposo la resistenza elettrica abbia subito un incremento dello 0,8 %.

Dalla Figura 9.27 si osserva una completa delaminazione dello strato inferiore del provino, dalla parte delle fibre tese, durante la seconda rampa di carico (situazione tratteggiata in nero sui singoli grafici). L'incremento complessivo della resistenza elettrica in condizioni di scarico, valutata rispetto alla situazione iniziale, è pari a circa il 5 %. Durante la penultima rampa di carico, si giunge a rottura anche degli strati intermedi del laminato, registrando un incremento di resistenza elettrica complessivo del 12 % (Figura 9.28).



FIG.9.27 Immagine del campione sotto sforzo al termine della seconda rampa di carico.



FIG.9.28 Immagine del campione sotto sforzo al termine della quarta rampa di carico.

La quinta ed ultima rampa di carico conclude il test. Il delta finale è pari a 16 % di incremento.

Complessivamente ad ogni fase di scarico corrisponde una riduzione della resistenza elettrica che si normalizza comunque in condizioni di riposo ad un valore superiore rispetto alla condizione di riposo dello step precedente, a sottolineare la sensibilità acquisita nei confronti del danneggiamento. Lo si denota anche, osservando il grafico in Figura 9.29, dove ad ogni step successivo, il ciclo di carico-scarico si siede sempre di più sull'asse delle ascisse ad indicare che, a parità di forza applicata, lo spostamento complessivo esercitato sul provino è via via crescente. Con l'aumentare del danneggiamento ci si aspetta infatti che la resistenza flessionale del provino diminuisca e dunque aumenti la freccia massima verticale, a parità di condizioni di carico.

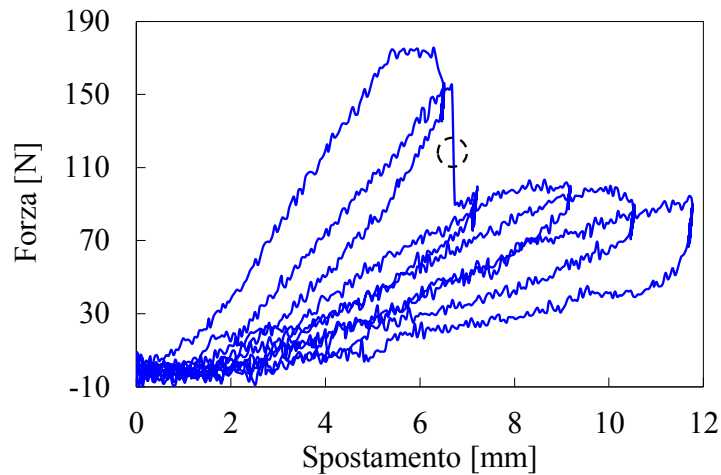


FIG.9.29 Forza applicata in funzione dello spostamento.

Infine, osservando il campione al microscopio ottico, si notano cricche complete dei vari strati e macro delaminazioni. Volendo meglio qualificare la zona delaminata si prepara il provino per essere osservato ai raggi x. Si utilizza un liquido penetrante radio opaco il cui costituente più importante è lo ioduro di zinco, perché responsabile del contrasto sotto l'azione dei raggi x. Vi sono poi altri componenti, tra i quali, acqua distillata e liquido fotografico; l'obiettivo è quello di creare un fluido molto poco viscoso che riesca a penetrare anche all'interno delle cricche più sottili. Ovviamente il danneggiamento deve affiorare in superficie o deve esserci una porosità o fessurazioni tali da permettere l'ingresso del liquido stesso. Trattate le superfici d'interesse, si attende almeno un'ora prima di eseguire la scansione. Si riportano alcune radiografie significative.



FIG.9.30 Radiografia laterale del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

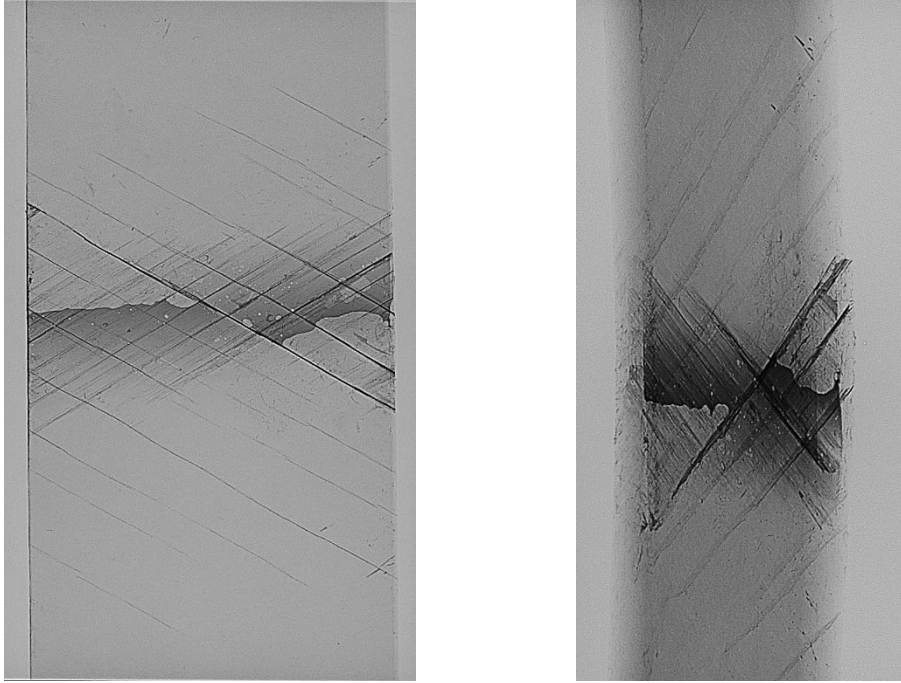


FIG.9.31 Radiografie frontali del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

9.7 Rampe di carico a flessione con cablaggio a 4 elettrodi circolari

Nel seguente test si eseguono delle rampe di carico mediante una prova a flessione a tre punti, come visto per il provino analizzato nel paragrafo precedente. La distanza tra i due appoggi sottostanti è pari a 52 mm e la spinta viene eseguita dal centro. La differenza consta nel tipo di cablaggio, i quattro elettrodi infatti ruotano attorno al provino, come è consuetudine fare nelle prove di *strain monitoring*. Si vuole valutare se e quali siano le differenze percepite in termini di variazioni elettriche rispetto alla configurazione a quattro elettrodi opposti. L'obiettivo è sempre quello di ottenere dei macro-danneggiamenti in termini di delaminazioni delle singole lamine, eseguendo una prova in *Controllo Spostamento*.

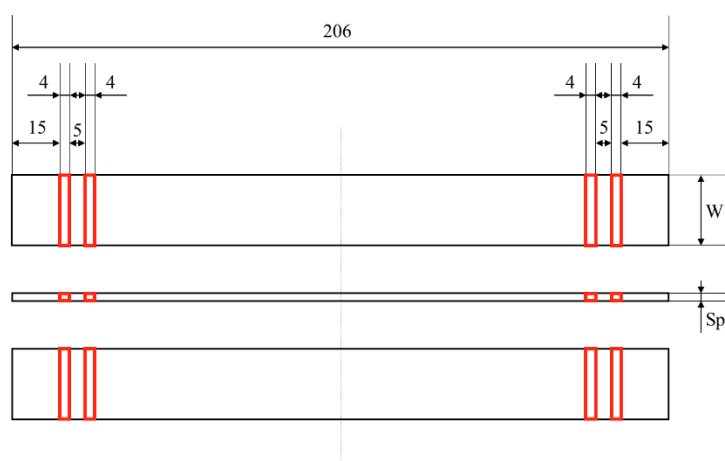


FIG.9.32 Configurazione a 4 Elettrodi Circolari – Geometria.

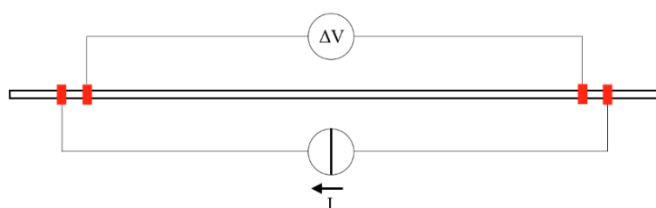


FIG.9.33 Configurazione a 4 Elettrodi Circolari - Collegamenti Elettrici.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,960$ mm, $Sp = 2,320$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Circolari;
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 7,02 %;
- velocità di avanzamento = 0,25 mm/s;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

Si hanno complessivamente sei rampe di carico, in ordine crescente di spostamento in termini di freccia verticale. Ad ogni rampa successiva corrisponderà dunque una deformata a flessione più marcata. Si cerca di ripetere le condizioni di carico della prova precedente.

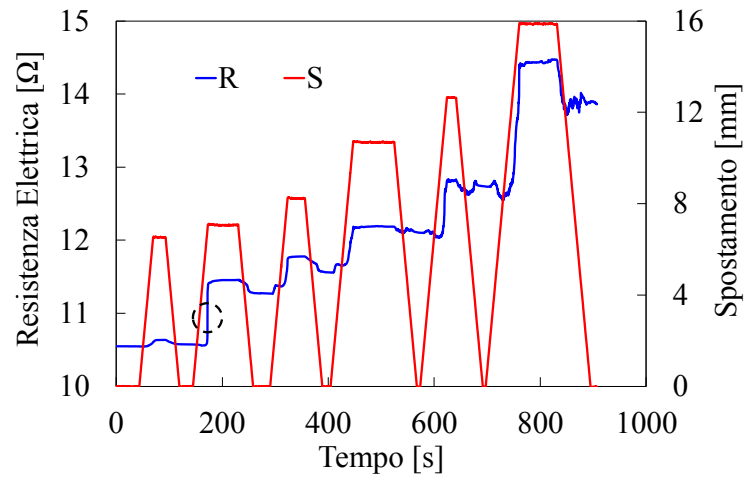


FIG.9.34 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo.

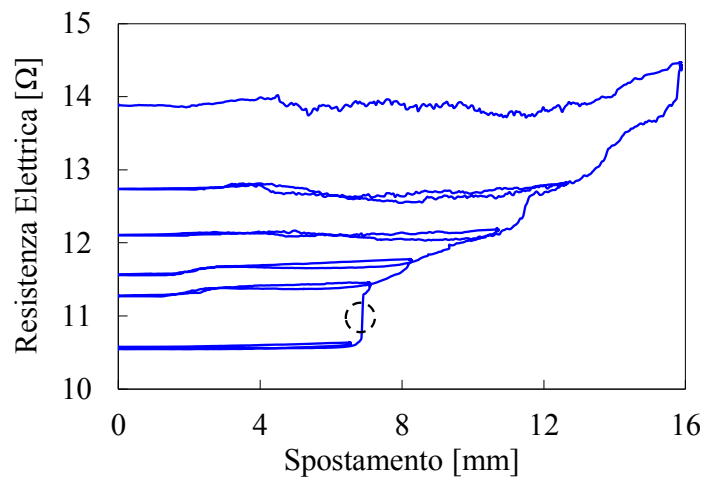


FIG.9.35 Resistenza elettrica in funzione dello spostamento.

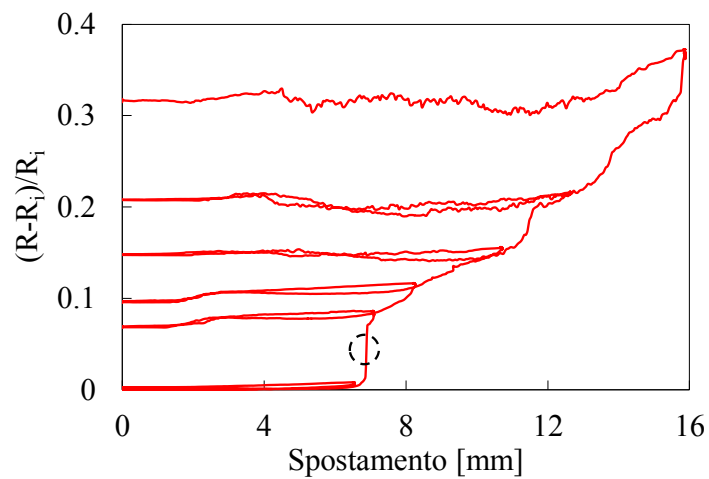


FIG.9.36 Incremento di resistenza elettrica in funzione dello spostamento.

Nella prima rampa non si percepiscono visivamente macro-danneggiamenti, nonostante in condizioni di riposo la resistenza elettrica abbia subito un incremento dello 0,2 %.

Dalla Figura 9.37 si osserva una completa delaminazione dello strato inferiore del provino, dalla parte delle fibre tese, durante la seconda rampa di carico (situazione tratteggiata in nero sui singoli grafici). L'incremento complessivo della resistenza elettrica in condizioni di scarico valutata rispetto alla situazione iniziale è pari a circa il 7 %.

Nella terza rampa non si avvertono né visivamente né in termini di rumore, rotture ulteriori del materiale, la resistenza aumenta comunque di un ulteriore 2,5 % fino a quota 9,5 % a denotare che qualcosa è successo. Si danneggia ulteriormente il materiale (Figura 9.38) anche negli strati interni (quarta rampa e quinta rampa) fin tanto che nell'ultima rampa di carico (Figura 9.40) non si rompono tutti gli strati del provino, ad eccezione dello strato superiore in compressione, delaminato. L'incremento di resistenza elettrica infatti supera un valore complessivo del 30 %.

Si noti in Figura 9.40, come nell'ultima condizione di riposo il danneggiamento del materiale risulti permanente, il provino infatti mantiene una deformata molto accentuata pur avendo scaricato la cella di carico.



FIG.9.37 Immagine del campione sotto sforzo, al termine della seconda rampa di carico.



FIG.9.38 Immagine del campione sotto sforzo, al termine della quarta rampa di carico.

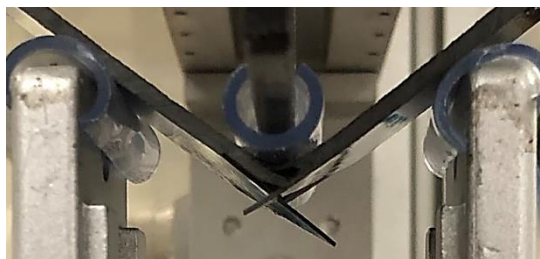


FIG.9.39 Immagine del campione sotto sforzo, al termine della sesta rampa di carico.

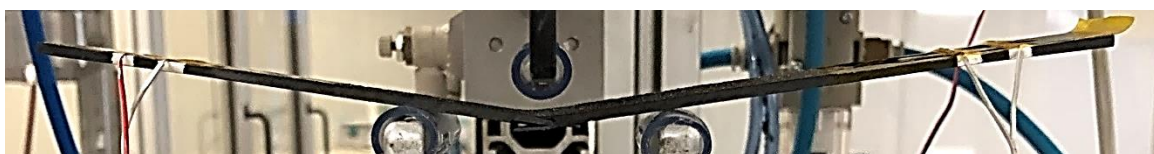


FIG.9.40 Immagine del campione a riposo a fine prova.

Anche in questo caso complessivamente ad ogni fase di scarico corrisponde una riduzione della resistenza elettrica che si normalizza comunque in condizioni di riposo ad un valore superiore rispetto alla condizione di riposo dello step precedente, a sottolineare la sensibilità acquisita nei confronti del danneggiamento. Ulteriore validazione del danneggiamento progressivo, la si ha osservando il grafico in Figura 9.41, dove ad ogni step successivo, il ciclo di carico-scarico si siede sempre di più sull'asse delle ascisse ad indicare che a parità di forza applicata lo spostamento complessivo esercitato sul provino è via via crescente. Con l'aumentare del danneggiamento ci si aspetta ancora una volta che la resistenza flessionale del provino diminuisca.

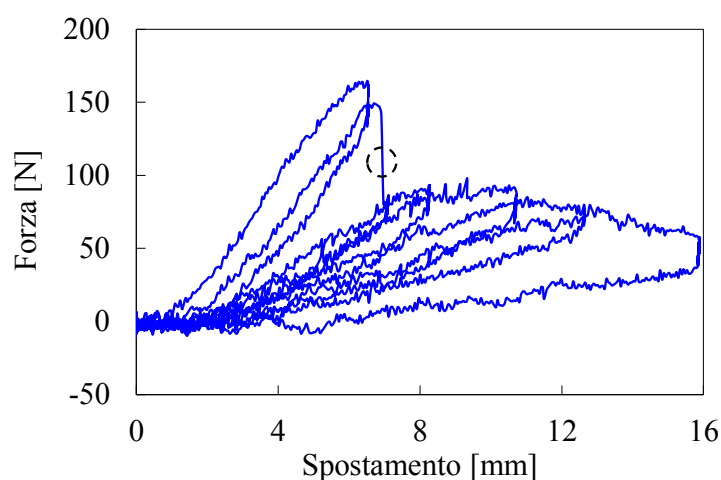


FIG.9.41 Forza applicata in funzione dello spostamento.

Pertanto, non sono necessarie micrografie del provino, avendo rimarcato la situazione della prova precedente. Si riportano comunque una serie di radiografie eseguite sul campione.



FIG.9.42 Radiografia laterale del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

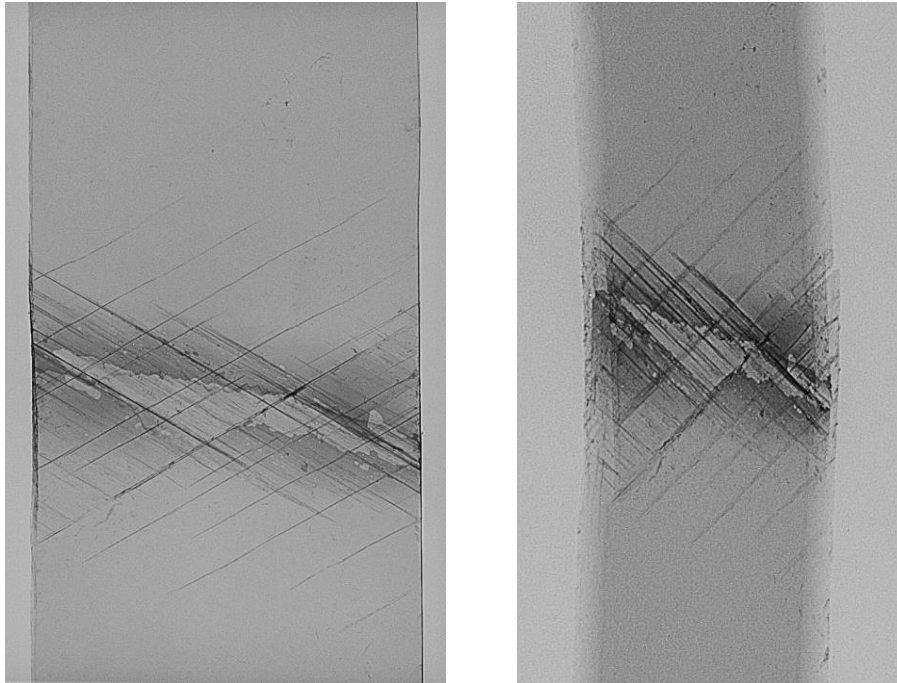


FIG.9.43 Radiografie frontali del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

9.7.1 Confronto tra le due prove a flessione

Si confrontano i test descritti nel seguente paragrafo ed in quello precedente (9.6 e 9.7).

In generale la resistenza elettrica del provino, sia allo stato non danneggiato che allo stato danneggiato, è più bassa cablando il provino con elettrodi circolari. Questo perché avendo depositato vernice tutt'attorno al campione, l'alimentazione interesserà tutti i *layer* e dunque la conducibilità elettrica sarà più elevata a discapito di una riduzione complessiva di resistenza. Generalmente questa differenza è più modesta, soprattutto con provini unidirezionali poiché, anche se si alimenta solo un *ply*, quest'ultimo già di suo ha una conducibilità molto elevata, ma il *lay-up* in esame è un $[+60_3/-60_3]_s$ dove la conducibilità di un singolo *ply* è molto più contenuta.

Analizzando gli incrementi di resistenza elettrica per- e post-rottura dello strato inferiore (prima e dopo la seconda rampa carico) si può affermare che:

- nel primo step (pre-rottura del *layer* inferiore) è più sensibile il provino cablato con quattro elettrodi opposti, infatti, a parità di spostamento (poco inferiore ai 7 mm), si raggiunge un incremento dello 0,8 % contro lo 0,2 %;
- dal secondo step in poi (post-rottura del *layer* inferiore) risulta più sensibile il provino cablato con quattro elettrodi circolari, l'incremento massimo è infatti superiore al 30 %.

Quindi con quattro elettrodi opposti si è più sensibili alle delaminazioni pre-rottura poiché la corrente è costretta ad attraversare tutto lo spessore del provino. Invece, con quattro elettrodi circolari, la sensibilità è maggiore nel caso in cui inizino a rompersi i vari strati del laminato, perché avendo tutti i *layer* collegati elettricamente dagli elettrodi circolari, se viene a mancare il contributo di un *layer* in termini di conducibilità elettrica, poiché giunto a rottura, lo si percepisce molto di più. Quindi, per il monitoraggio delle delaminazioni è più sensibile il campione cablato con quattro elettrodi opposti, mentre per monitorare la rottura dei singoli *ply*, è più sensibile il campione cablato con quattro elettrodi circolari. Confrontando invece le radiografie, la zona delaminata è del tutto simile per entrambi i provini.

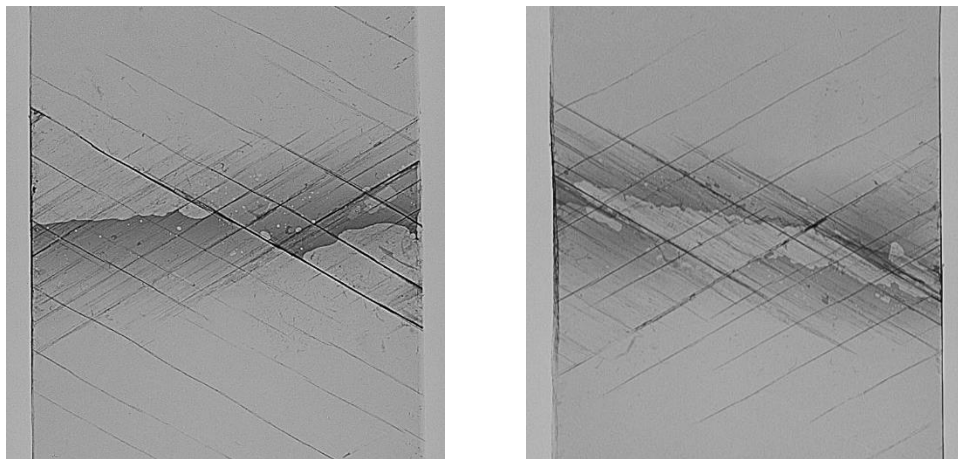


FIG.9.44 Confronto delle radiografie frontali del campione danneggiato a trazione ciclica e flessione a rampe (sinistra) e del campione danneggiato a flessione a rampe (destra); osservazione della zona delaminata.

9.8 Rampe di carico a trazione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. B]

Come ultimo test per la seguente configurazione del laminato $[+60_3/-60_3]_s$, si esegue sempre una prova a trazione a rampe, con provino cablato con quattro elettrodi opposti ma le cui distanze sono state valutate secondo delle prove riportate in letteratura [1].

Si posizionano gli elettrodi sempre due su una faccia e due sull'altra ritenendo di avere una maggiore sensibilità a ciò che succede negli strati interni di materiale e non solo allo strato interessato dal cablaggio elettrico.

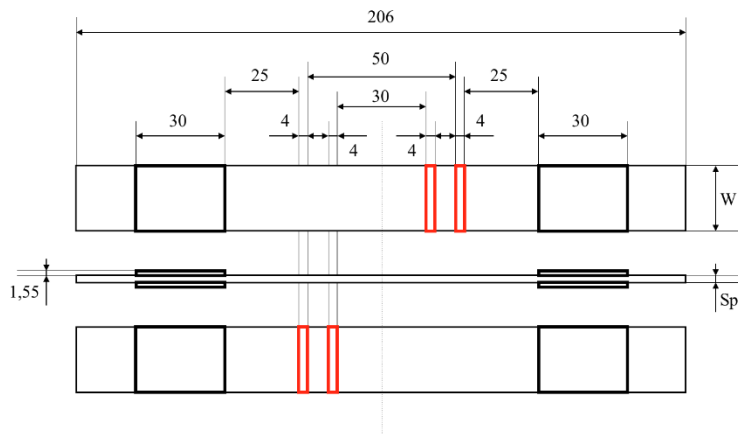


FIG.9.45 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B) – Geometria.

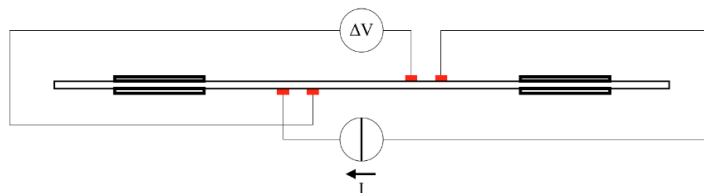


FIG.9.46 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B) - Collegamenti Elettrici.

La prova condotta avviene in *Controllo Spostamento*. Per ogni rampa di carico si monitora la forza massima applicata dalla macchina con la consapevolezza che il carico di cedimento del provino, valutato mediante il primo test, è dell'ordine dei 2 kN.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 23,082$ mm, $Sp = 2,302$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B);
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 13,87 %;
- velocità di avanzamento = 2,00 mm/min;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

Durante la prova si eseguono complessivamente sette rampe di carico per un valore progressivamente pari a 1000 N, 1000 N, 1500 N, 1600 N, 2000 N, 2300 N e 2300 N.

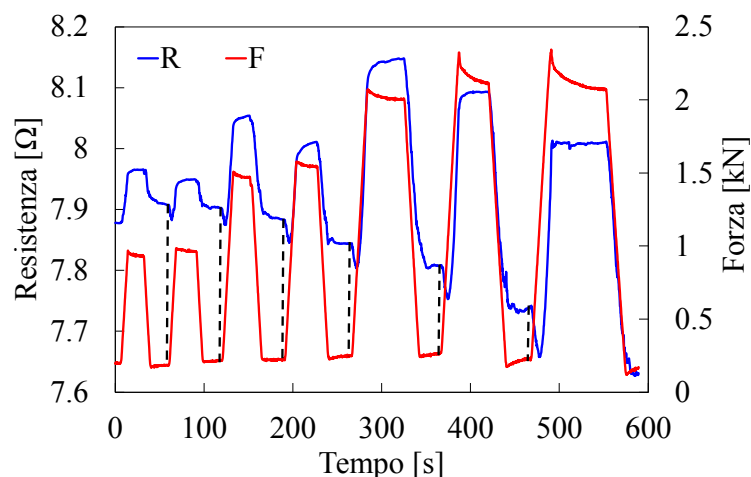


FIG.9.47 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo.

Ancora una volta l'andamento della resistenza elettrica risulta essere complessivamente negativo, la riduzione totale registrata è del 3,14 %, inoltre si ha il solito effetto di riduzione e successivo aumento della resistenza elettrica durante ogni singola rampa di carico.

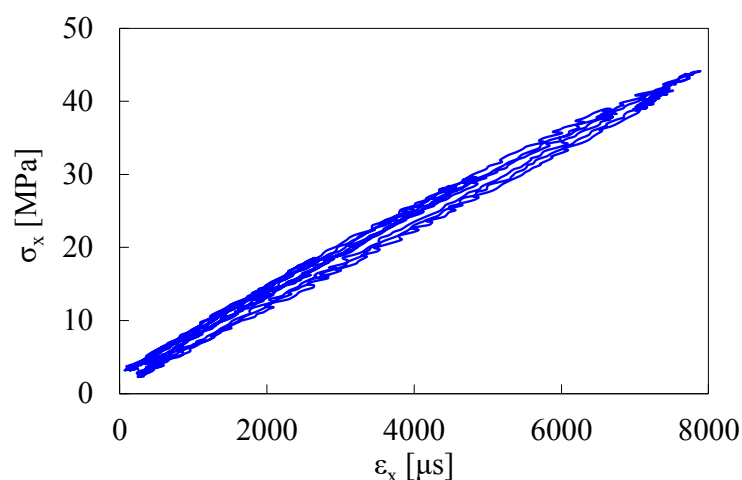


FIG.9.48 Curve ingegneristiche, sforzo in funzione della deformazione longitudinale.

Osservando il provino al microscopio ottico, si osserva solamente una cricca compresa tra gli elettrodi di misura. Mentre il campione appare molto danneggiato in corrispondenza delle zone limitrofe alle *tab*, in particolar modo si esamina una zona di imminente cedimento, caratterizzata da due ampie delaminazioni tra gli strati esterni con fibre orientate a +60° e gli strati interni con fibre orientate a -60°; e un susseguirsi di cricche che giungono fino a bordo provino.

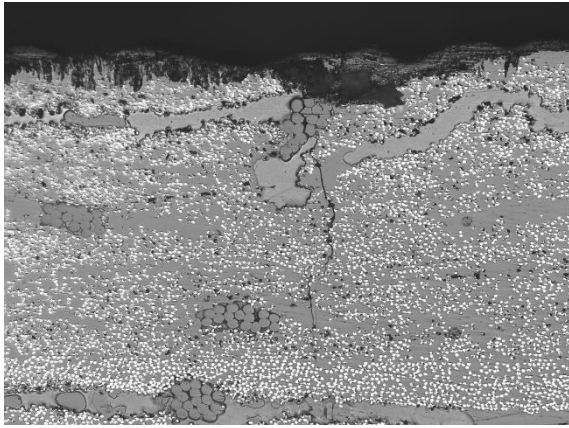


FIG.9.49 Micrografia 100x – zona interna agli elettrodi.

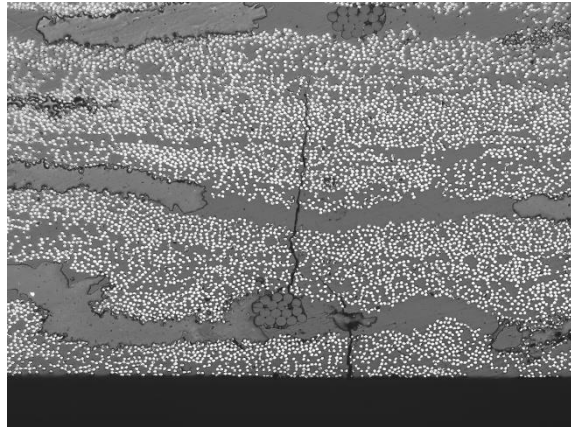


FIG.9.50 Micrografia 100x – zona esterna agli elettrodi.

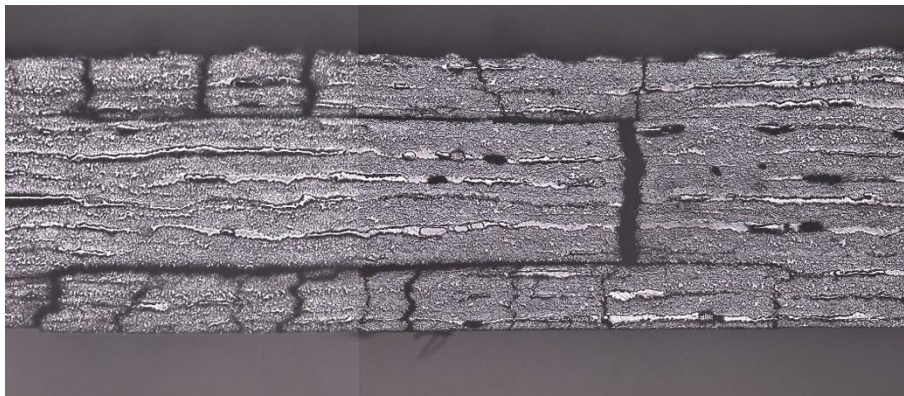


FIG.9.51 Micrografia 25x – zona delaminata in prossimità della tab.

9.9 Commenti

Osservando l'ultimo test analizzato, è possibile fare una considerazione aggiuntiva. Nelle prime storie di carico (Figura 9.47) la resistenza elettrica in condizioni di riposo, risulta nominalmente superiore rispetto al valore assunto nella precedente valle durante il primo tratto di rampa. Ma a partire dalla terza rampa in poi, nella fase di scarico, post rampa, si è sempre più vicini al valore assunto nella precedente valle durante il primo tratto di rampa. Sembra quindi che il materiale durante una prima fase di carico subisca un riallineamento delle fibre lungo la direzione di applicazione del carico, con riduzione dell'angolo di *off-axis*. Questo comporterebbe un incremento di conducibilità elettrica a discapito di un decremento della resistenza. Si sottolinea come questo comportamento sia osservabile in tutte le prove a trazione precedentemente eseguite. Nella seconda fase, a riallineamento completato, subentra il classico effetto piezoresistivo che determina infatti una risalita della resistenza elettrica.

Ci si spiega quindi la differenza analizzata precedentemente tra le prime rampe e le successive, ipotizzando che, tale riallineamento possa essere permanente o meno in funzione delle tensioni a cui è sottoposto il provino. Quindi, se il riallineamento non è permanente, quando si scarica il provino, le fibre tornano alla loro posizione iniziale raggiungendo un valore di resistenza superiore rispetto al valore registrato a fine riallineamento (valle). Mentre, se il riallineamento è permanente, quando si scarica il provino, le fibre non tornano più alla loro posizione iniziale e si mantiene quindi un valore di resistenza simile al valore registrato a fine riallineamento (valle).

Inoltre, si può notare come, nella quinta, sesta e settima rampa, pur aumentando il carico applicato, l'incremento di resistenza, per effetto piezoresistivo, è progressivamente inferiore, ma questo non perché tale effetto sia più o meno incisivo ma perché è il valore di partenza nella condizione di scarico ad essere cambiato, e si pensa appunto che sia diminuito a seguito di questa presunta riduzione dell'angolo di *off-axis* delle fibre.

Ma in generale se il materiale si è danneggiato in termini di cricche e delaminazioni, si dovrebbe notare anche una risalita della resistenza elettrica. Si veda la seconda prova descritta con danneggiamento pari ad una trentina di cricche (paragrafo 9.3).

Si ipotizza che il presunto riallineamento delle fibre contribuisca ad una riduzione della resistenza elettrica in contributo maggiore rispetto a quanto dovrebbe aumentare per eventuali danneggiamenti. La riduzione dell'angolo di *off-axis* con redistribuzione delle fibre lungo la direzione di applicazione del carico quindi, sembra surclassare il monitoraggio del danneggiamento, oggetto dei test eseguiti, fatta eccezione per le prove a flessione, condotte secondo delle rampe di carico, dove si raggiungono però dei macro-danneggiamenti, i provini infatti sono stati altamente deformati.

Si sottolinea come le analisi conclusive siano solo delle considerazioni e non delle teorie esatte. A tal proposito però si indaga il riallineamento richiamando il codice implementato nel Capitolo 2.

Complessivamente si registrano le seguenti riduzioni di resistenza elettrica:

- - 0,31 % (prova statica a trazione, Paragrafo 9.2);
- - 1,80 % (prova ciclica a trazione, Paragrafo 9.3);
- - 3,44 % (rampe di carico a trazione, Paragrafo 9.4);
- - 0,44 % (prova ciclica a flessione, Paragrafo 9.5);
- - 3,14 % (rampe di carico a trazione, Paragrafo 9.8).

Si considerano inoltre i reali valori di resistività in piano del materiale in esame:

$$\eta_1 = 0,059 \Omega \cdot \text{mm}$$

$$\eta_2 = 64,4 \Omega \cdot \text{mm}$$

Implementando dunque la *CLT* elettrica, si calcolano i valori effettivi di riduzione dell'angolo di *off-axis*, necessari per garantire delle riduzioni di resistività pari ai valori riportati precedentemente. Analizzando solo le condizioni limite e tralasciando i valori intermedi si ottiene che:

- una riduzione di resistività dello 0,31 % equivarrebbe ad una riduzione dell'angolo di *off-axis* pari a cinque centesimi di grado, nello specifico corrisponderebbe ad una variazione del *lay-up* da $[+60_3/-60_3]_s$ a $[+59,95_3/-59,95_3]_s$;
- una riduzione di resistività del 3,44 % equivarrebbe ad una riduzione dell'angolo di *off-axis* pari a circa sei decimi di grado, nello specifico corrisponderebbe ad una variazione del *lay-up* da $[+60_3/-60_3]_s$ a $[+59,41_3/-59,41_3]_s$.

Quindi, restano comunque delle supposizioni, ma visti gli angoli di riduzione calcolati, è plausibile pensare che ci possa essere un riallineamento delle fibre lungo la direzione di applicazione del carico.

9.10 Referenze

- [25] Kazuomi Omagari, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, *Detection of Matrix Cracking of CFRP Using Electrical Resistance Changes*, Key Engineering Materials, 297-300, 2005, p.2096-2101.

HEALTH MONITORING SU PROVINI SIMMETRICI CROSS-PLY [0₂/90₄]_s

10.1 Introduzione

Nel seguente capitolo verranno analizzate diverse prove sperimentali di *Health Monitoring* secondo varie modalità di carico e di configurazione degli elettrodi. I provini testati hanno un *lay-up* [0₂/90₄]_s.

Per ogni test si riportano i parametri principali di esecuzione e di misura, in particolare, di volta in volta, si procede preliminarmente con il calcolo della resistenza di contatto calcolata come descritto nel paragrafo introduttivo del capitolo precedente (9.1).

Si sottolinea, anche in questo caso, come i parametri geometrici, quali spessore e larghezza del provino, siano la media di cinque misurazioni eseguite sul campione post preparazione prova, poiché sia le superfici degli elettrodi, preparate con carta abrasiva grana 180, sia i *cut edge* eventualmente lucidati, conferiscono una riduzione rispettivamente di spessore e larghezza, inficiando sul valore reale dell'area della sezione resistente media, durante l'esecuzione dei test.

10.2 Prova ciclica a trazione-compressione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. B]

Con il seguente test si vuole cercare di caratterizzare il fenomeno piezoresistivo del materiale, in particolar modo la sua ripetibilità a parità di carichi in gioco (ampiezza di carico). Si vogliono impostare delle sinusoidi con rapporto di ciclo pari a -1 per valutare anche eventuali discrepanze tra condizioni di carico di trazione e condizioni di carico di compressione.

Per il valore della forza applicata si considera che il cedimento statico dei provini unidirezionali con le fibre orientate a 90° è avvenuto tra valori di deformazione compresi tra 3500 μs e 4000 μs. Si pone particolare riguardo quindi, a mantenersi ben lontani da tale valore al fine di non creare danneggiamento negli strati a 90, il fenomeno piezoresistivo che si vuole monitorare deve essere esente da qualsiasi influenza in termini di danneggiamento.

Si esegue quindi la prova in *Controllo Forza*.

Gli elettrodi vengono posizionati sempre seguendo le specifiche distanze osservate in letteratura [1] ma interessando entrambe le facce del campione per indurre la corrente ad attraversarne lo spessore. Si riportano di seguito geometria del provino e collegamenti elettrici.

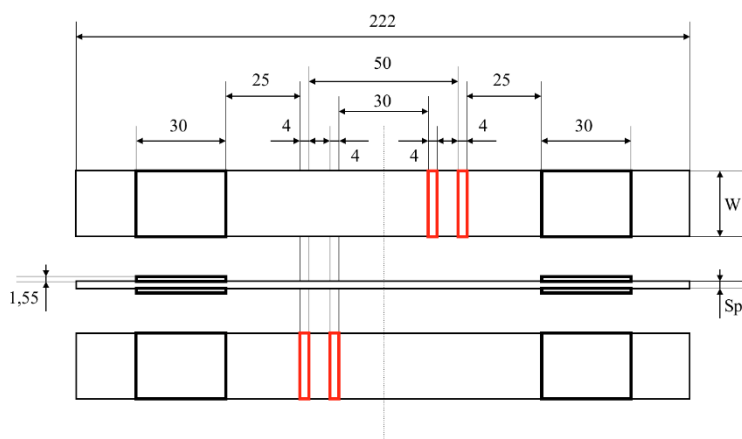


FIG.10.1 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B) – Geometria.

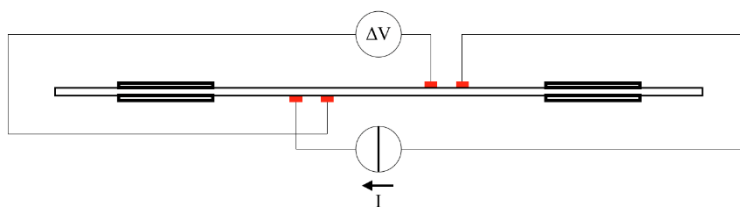


FIG.10.2 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B) - Collegamenti Elettrici.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 20,628$ mm, $Sp = 2,310$ mm;
- configurazione a 4 elettrodi opposti (variante B);
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 19,34 %;
- $F_{max} = 1000$ N, 1500 N, 1750 N;
- $F_{media} = 0$ N;
- $F_{min} = -1000$ N, -1500 N, -1750 N;
- $R = -1$;
- frequenza di carico = 0,25 Hz;
- frequenza di acquisizione dati = 10 Hz.

Si eseguono quindi cinque storie a fatica in bassa frequenza, la cui ampiezza è definita dai valori di forza massima e minima sopra definiti. Si noti dai grafici successivi come l'andamento della resistenza elettrica complessiva, segua il trend corrispettivo della forza applicata per i soli tratti in trazione.

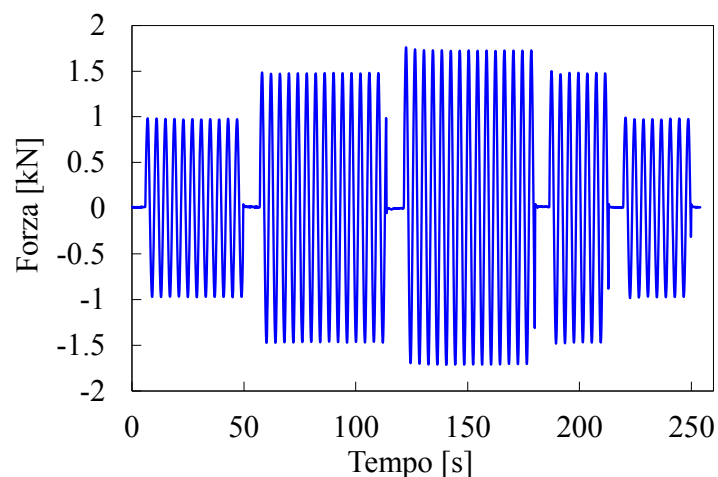


FIG.10.3 Forza applicata in funzione del tempo.

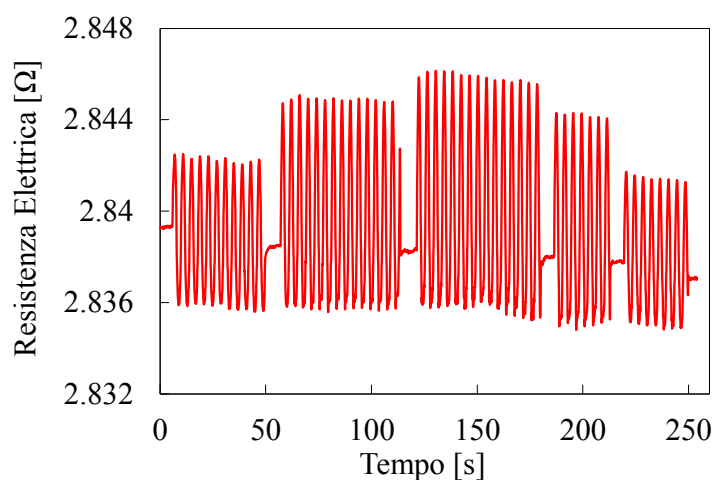


FIG.10.4 Resistenza elettrica in funzione del tempo.

Confrontando forza e resistenza elettrica si osservano delle curve di isteresi da un punto di vista elettrico. La resistenza elettrica aumenta con l'aumentare della forza e decresce con il diminuire, rispetto ad un valore nominale, seguendo due percorsi ben distinti. Si confrontino, in particolar modo, il primo blocco di carico con il quinto e il secondo blocco di carico con il quarto, per i quali, a due a due, sono stati impostati i medesimi parametri di test.

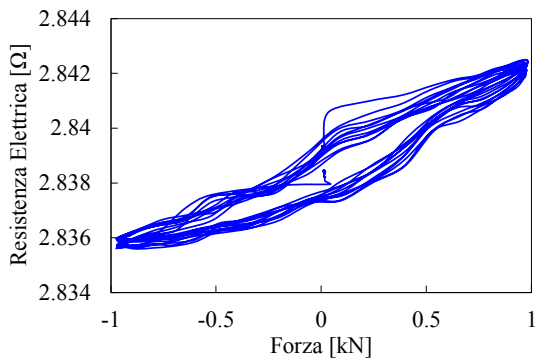


FIG.10.5 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata durante il primo blocco di cicli.

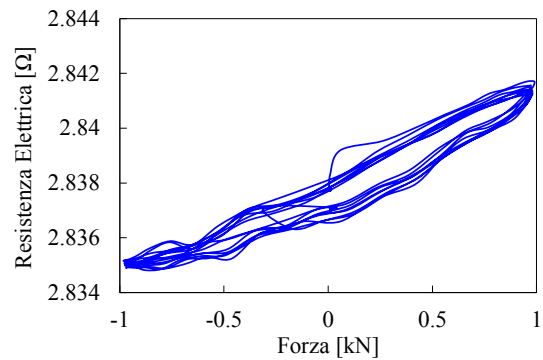


FIG.10.6 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata durante il quinto blocco di cicli.

Per il primo e per il quinto blocco di carico, la resistenza elettrica subisce una variazione di $+0,13/+0,15\%$ e $-0,11/-0,09\%$ rispetto al valor medio tra le due condizioni di riposo, pre e post blocco di cicli. La variazione percentuale assoluta, valutata tra il picco massimo e il picco minimo, è quindi pari, per entrambe le situazioni, al 24% .

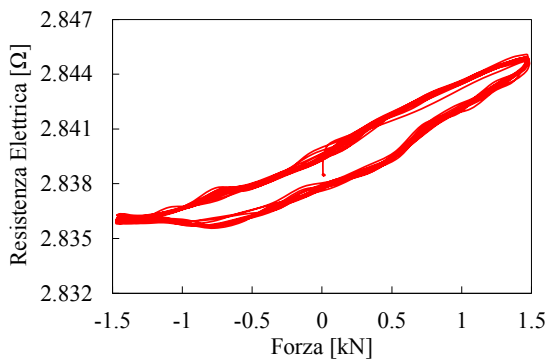


FIG.10.7 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata durante il secondo blocco di cicli.

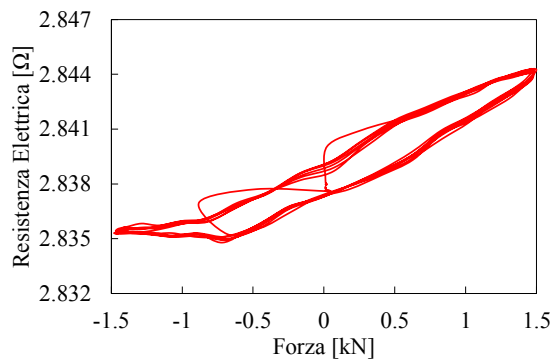


FIG.10.8 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata durante il quarto blocco di cicli.

Per il secondo e per il quarto blocco di carico, la resistenza elettrica subisce una variazione di $+0,23\%$ e $-0,09\%$ rispetto al valor medio tra le due condizioni di riposo, pre e post blocco di cicli. La variazione percentuale assoluta, valutata tra il picco massimo e il picco minimo, è quindi pari, per entrambe le situazioni, al 32% .

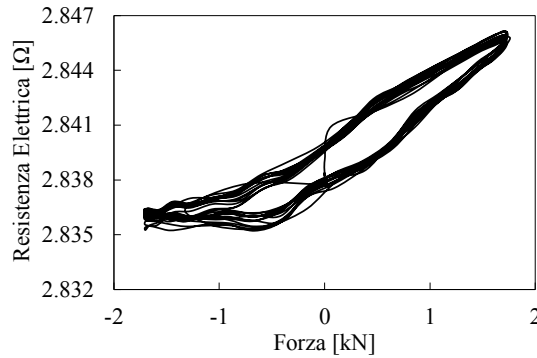


FIG.10.9 Resistenza elettrica in funzione della forza applicata durante il terzo blocco di cicli.

Infine, per il blocco centrale, la resistenza elettrica subisce una variazione di +0,28 % e -0,10 % rispetto al valor medio tra le due condizioni di riposo, pre e post blocco di cicli. La variazione percentuale assoluta, valutata tra il picco massimo e il picco minimo, è quindi pari al 38 %.

Pertanto, si può concludere dicendo che il fenomeno non solo è proporzionale, incrementando il carico infatti, aumenta il valore della variazione della resistenza elettrica rispetto al valor medio di ogni blocco di isteresi, ma è ripetibile, avendo trovato variazioni identiche per medesime ampiezze di carico.

Però, sembra che il fenomeno sia più sensibile a trazione, raggiungendo incrementi proporzionalmente maggiori in funzione della forza applicata; per valori di carico pari a 1000 N, 1500 N e 1750 N, si hanno infatti incrementi rispettivamente pari a +0,13 %, +0,23 % e +0,28 %. In compressione invece, non solo l'effetto piezoresistivo sembra essere meno sensibile, ma il valore stesso di decremento della resistenza elettrica, sembra stabilizzarsi in un intorno di -0,09 % a prescindere dal carico applicato.

Volendo valorizzare il fenomeno, si considerano per ogni blocco di cicli tre rampe di carico; per ognuna si considera la variazione di resistenza elettrica misurata e il valore massimo di deformazione, al fine di ottenere il corrispettivo *gage factor*, secondo quanto segue:

$$k = \frac{\Delta R}{R_i} \cdot \frac{1}{\varepsilon_i} \quad (10.1)$$

In Tabella 10.1 si riportano i risultati ottenuti e rispettivi valori medi, evidenziando con colori uguali i risultati relativi a medesimi blocchi di carico.

	Resistenza [Ω]			Deformazione [μs]	Gage Factor
	R_i	R_f	ΔR	ϵ_f	k
1a Storia [14.2s-14.9s]	2.8406	2.8422	0.0016	562.79	1.001
1a Storia [26.1s-26.9s]	2.8399	2.8422	0.0023	548.32	1.464
1a Storia [46.2s-46.9s]	2.8403	2.8423	0.0019	543.50	1.257
					1.2
2a Storia [61.3s-62.3s]	2.8414	2.8444	0.0030	876.20	1.221
2a Storia [81.3s-82.2s]	2.8414	2.8447	0.0032	929.24	1.227
2a Storia [105.3s-106.1s]	2.8410	2.8448	0.0037	919.60	1.424
					1.3
3a Storia [129.7s-130.5s]	2.8422	2.8461	0.0039	1069.07	1.290
3a Storia [149.7s-150.6s]	2.8421	2.8457	0.0036	1040.14	1.211
3a Storia [169.7s-170.6s]	2.8419	2.8456	0.0037	1112.47	1.177
					1.2
4a Storia [190.8s-191.6s]	2.8415	2.8442	0.0027	803.88	1.182
4a Storia [198.7s-199.6s]	2.8403	2.8441	0.0038	900.31	1.486
4a Storia [206.7s-207.6s]	2.8401	2.8440	0.0039	909.96	1.517
					1.4
5a Storia [223.9s-224.8s]	2.8397	2.8413	0.0016	524.21	1.061
5a Storia [231.8s-232.5s]	2.8389	2.8414	0.0025	567.61	1.552
5a Storia [243.9s-244.8s]	2.8393	2.8412	0.0019	553.14	1.197
					1.3
					1.28

TAB.10.1 Calcolo del *gage factor* per diverse misurazioni acquisite.

Trattandosi del medesimo campione si dovrebbero ottenere risultati identici, ma considerando piccole oscillazioni di segnale sia nell'acquisizione della deformazione che della resistenza elettrica si accettano leggere variazioni. Complessivamente quindi, per i provini in esame, il valore che relaziona la variazione di resistenza elettrica in funzione della deformazione ingegneristica, è pari ad 1,28. Considerando il *lay-up* dei campioni in esame $[0_2/90_4]_s$, ed i valori medi riportati in letteratura per provini unidirezionali, pari a 2, si può concludere ritenendo il risultato ottenuto plausibile, essendo del medesimo ordine di grandezza.

10.3 Rampe di carico a trazione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. B]

Si procede con il medesimo campione della prova precedente, il quale, secondo le considerazioni fatte, non dovrebbe presentare alcun tipo di danneggiamento. Il test consta sempre in una successione di rampe di carico con provino cablato con quattro elettrodi opposti, come visibile nel paragrafo precedente in Figura 10.1 e Figura 10.2.

La prova condotta avviene in *Controllo Spostamento*. Per ogni rampa di carico si monitora la forza massima applicata dalla macchina con la consapevolezza che il cedimento statico dei provini unidirezionali con le fibre orientate a 90° è avvenuto tra valori di deformazione compresi tra $3500 \mu s$ e $4000 \mu s$.

Rispetto ai parametri impostati con provini $[+60_3/-60_3]_s$ logicamente la velocità di avanzamento della cella di carico viene ridotta poiché, a parità di spostamento e di materiale, le forze in gioco con i *cross-ply* saranno decisamente più elevate.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 20,628 \text{ mm}$, $Sp = 2,310 \text{ mm}$;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B);
- corrente iniettata = 50 mA ;
- resistenza di contatto = $+ 28,88 \%$;
- velocità di avanzamento = $0,01 \text{ mm/s}$;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz .

Durante la prova si eseguono complessivamente otto rampe di carico, secondo valori incrementali della forza applicata.

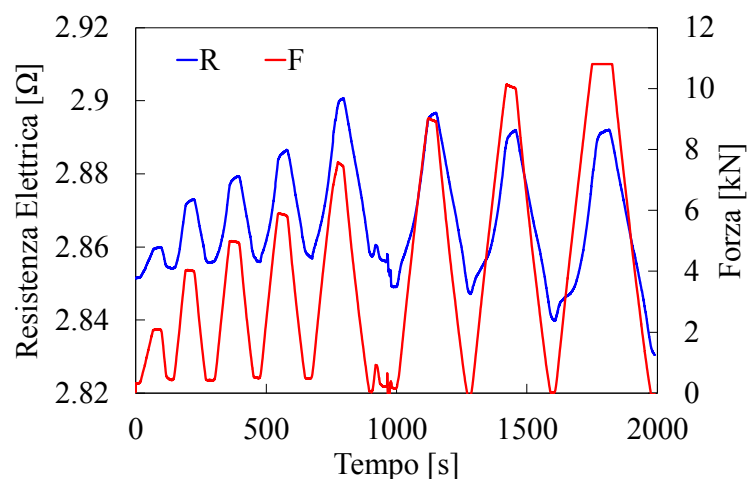


FIG.10.10 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo.

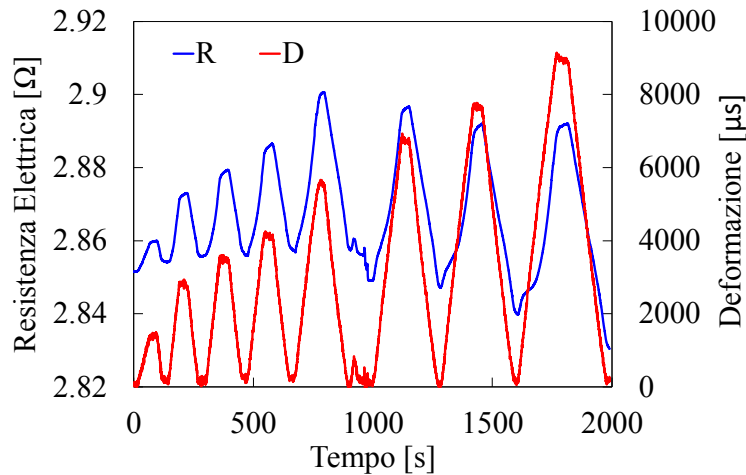


FIG.10.11 Resistenza elettrica e deformazione in funzione del tempo.

Con le prime due rampe non si dovrebbe aver danneggiato gli strati a 90° poiché complessivamente la deformazione è inferiore a $4000 \mu s$, mentre con le successive si incrementano i carichi in giorno, al fine di ottenere dei danneggiamenti negli strati interni del campione, senza giungere a rottura delle fibre a 0° . Si sottolinea che le oscillazioni di riposo a seguito della quinta rampa sono dovute ad un serraggio aggiuntivo eseguito sulla macchina, avendo percepito un leggero scivolamento del provino. L'andamento della resistenza elettrica torna a descrivere una deriva negativa, la riduzione totale registrata è dello $0,74 \%$. A differenza dei test descritti nel capitolo precedente però la curva che descrive la resistenza elettrica sembra fittare perfettamente l'andamento del carico applicato, viene a mancare quel fenomeno secondo il quale, durante il primo tratto di una rampa di carico la resistenza subiva un calo. D'altra parte, la presunta riduzione dell'angolo di *off-axis*, in questo caso non può sussistere avendo fibre o parallele o perpendicolari rispetto la direzione di applicazione del carico.

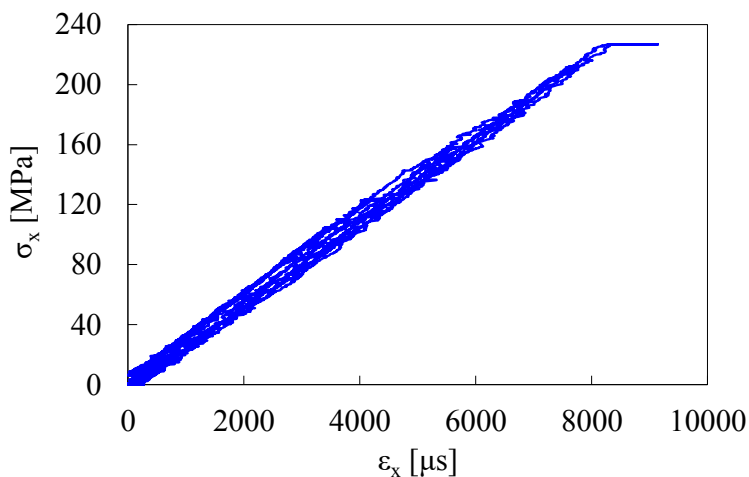


FIG.10.12 Curve ingegneristiche, sforzo in funzione della deformazione longitudinale.

Osservando i trend delle curve ingegneristiche, in Figura 10.12, non si notano grandi spostamenti tra le stesse. Si decide quindi di utilizzare il medesimo campione per un'ulteriore prova a fatica.

10.4 Prova ciclica a trazione con cablaggio a 4 elettrodi opposti [v. B]

Con il medesimo campione delle prove precedenti, si esegue una prova a fatica in *Controllo Forza*.

I cablaggi elettrici non sono stati modificati, ed è possibile osservarne geometria e configurazione in Figura 10.1 e Figura 10.2.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 20,628$ mm, $Sp = 2,310$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante B);
- corrente iniettata = 50 mA;
- resistenza di contatto = + 25,02 %;
- $F_{max} = 10000$ N;
- $F_{media} = 5000$ N;
- $F_{min} = 0$ N;
- frequenza di carico = 0,5 Hz;
- frequenza di acquisizione dati = 10 Hz.

Il test viene condotto in bassa frequenza ma questa volta con rapporto di ciclo maggiore di zero, inoltre si è incrementata la frequenza di acquisizione dati per monitorare i vari parametri in continuo, senza eseguire degli stop e fare delle letture ogni x cicli.

Poi, considerando che il cedimento statico dei provini unidirezionali con le fibre orientate a 0° è avvenuto per valori di carico compresi tra 23,9 kN e 24,7 kN e che il numero di *ply* complessivi a 0° sono otto negli unidirezionali e quattro nei *cross-ply*, è plausibile affermare che il cedimento del provino in esame dovrebbe avvenire in un intorno di 12 kN. Per quanto riguarda il contributo dei *ply* a 90° , in termini di resistenza meccanica, considerando geometria del provino in esame e carico di rottura statico dei provini unidirezionali con le fibre orientate a 90° , risulta essere pari a 680 N.

Si imposta quindi un'ampiezza di carico tale per cui le fibre a 0° non dovrebbero giungere a rottura, l'obiettivo è quello di ottenere quante più cricche possibili negli strati a 90° e sperare in una risalita della resistenza elettrica.

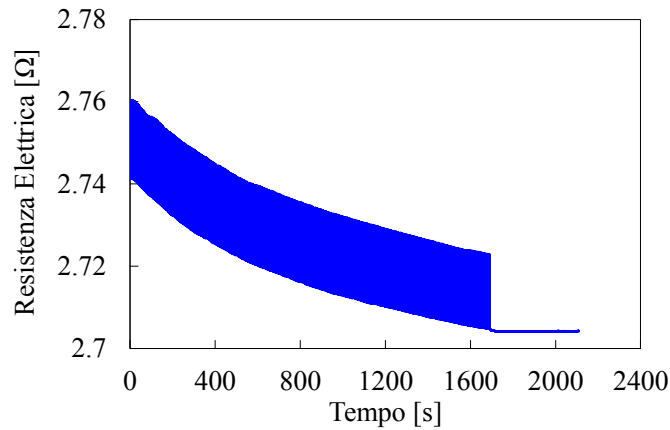


FIG.10.13 Resistenza elettrica in funzione del tempo.

Il trend purtroppo, è complessivamente negativo, la riduzione di resistenza elettrica valutata tra la prima condizione di scarico e l'ultima è pari a 1,33 % mentre tra la prima condizione di carico e l'ultima è pari a 1,37 %, per una media complessiva di -1,35 %.

Si riportano inoltre, a titolo di esempio, le prime dieci acquisizioni e le ultime dieci.

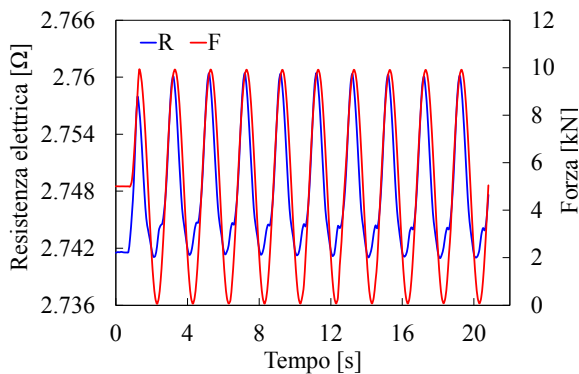


FIG.10.14 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo, nel corso dei primi dieci cicli.

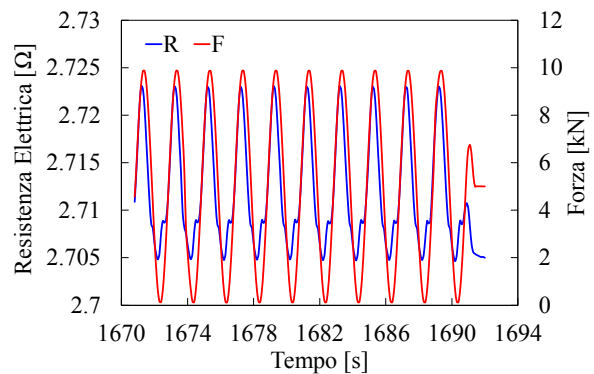


FIG.10.15 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo, nel corso degli ultimi dieci cicli.

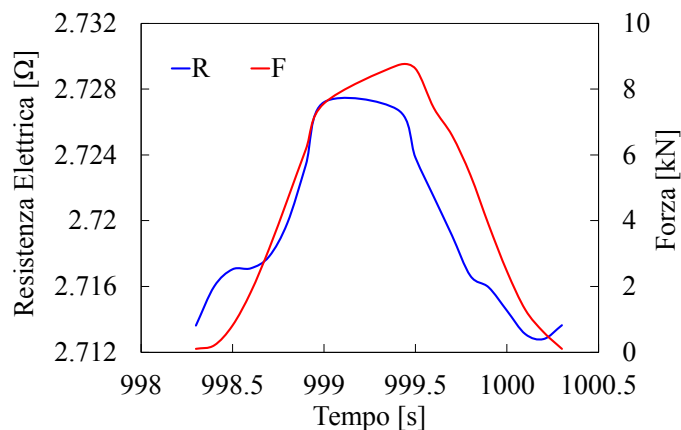


FIG.10.16 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo nel corso del ciclo numero 500.

Infine, si osservi il comportamento della resistenza elettrica in funzione del carico applicato (Figura 10.16); si sono presi dei valori relativi ad un singolo carico-scarico in corrispondenza di circa metà prova. Si decide infine, di interrompere il test nel corso del ciclo numero 1055. A seguito quindi delle tre prove subite, si analizza il provino al microscopio ottico per valutarne eventuali danneggiamenti. Nella zona compresa tra gli elettrodi di misura si contano un numero totale di cricche pari a 16 che raggiungono quota 26 considerando anche la zona compresa tra gli elettrodi di alimentazione. Invece, al di fuori delle zone di misura ma comunque all'interno dell'area sollecitata durante le prove (interno *tab*) si aggiungono ulteriori 23 cricche per un totale di 49.

I danneggiamenti interessano i soli strati interni del provino aventi fibre orientate a 90° e ricoprono tutto lo spessore dello strato a 90° . Complessivamente il campione risulta quindi molto danneggiato. Si riportano alcune micrografie rappresentative.

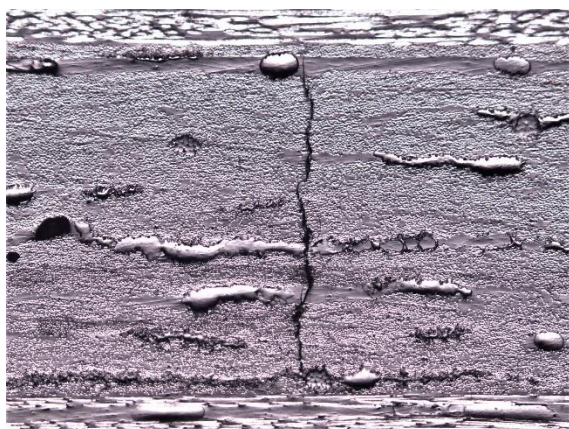


FIG.10.17 Micrografia 50x – zona interna agli elettrodi di misura.

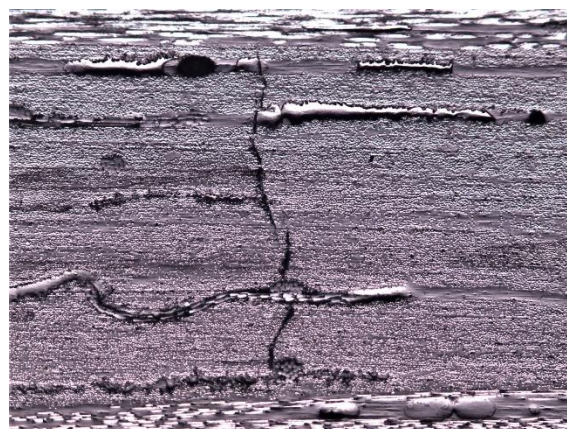


FIG.10.18 Micrografia 50x – zona interna agli elettrodi di misura.

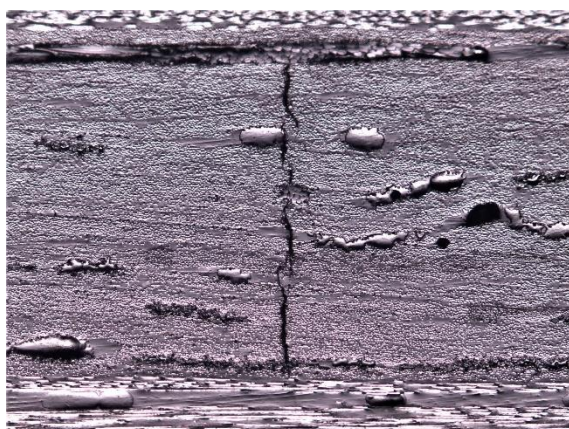


FIG.10.19 Micrografia 50x – zona interna agli elettrodi di misura.

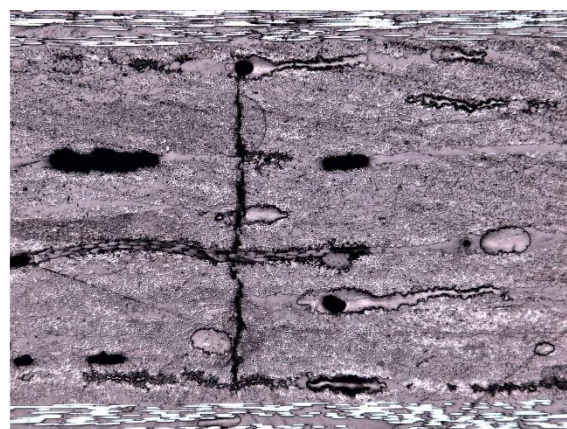


FIG.10.20 Micrografia 50x – zona interna agli elettrodi di alimentazione.

10.5 Rampe di carico a trazione con cablaggio a 4 elettrodi passanti

Per la seguente prova si testa una nuova soluzione di cablaggio. Si vuole escludere l'influenza dello stato tensionale sulla superficie degli elettrodi, quindi vengono posizionati esternamente rispetto alle *tab* del provino. Inoltre, si vuole condizionare nell'alimentazione, tutti i *layer* del campione. Si eseguono pertanto, quattro fori passanti sui quali verranno ancorati quattro bulloni M6 in acciaio ed infine, con l'utilizzo di due dadi per ogni bullone, si fissa all'intero di essi un *faston* con il corrispettivo cablaggio di misura o alimentazione. La geometria dei cablaggi elettrici è stata definita in funzione degli spazi disponibili sulla cella di carico utilizzata e viene di seguito rappresentata.

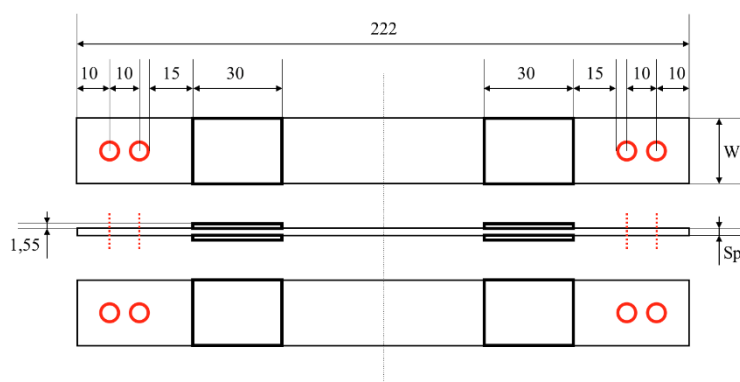


FIG.10.21 Configurazione a 4 Elettrodi Passanti – Geometria.

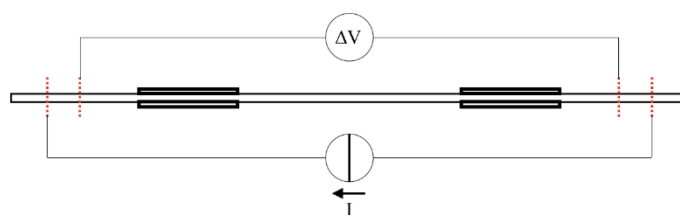


FIG.10.22 Configurazione a 4 Elettrodi Passanti - Collegamenti Elettrici.

Il test consiste quindi in una successione di rampe di carico ed avviene in *Controllo Spostamento*. Per ogni rampa di carico si monitora la forza massima applicata dalla macchina con la consapevolezza che il cedimento statico dei provini unidirezionali con le fibre orientate a 90° è avvenuto tra valori di deformazione compresi tra $3500 \mu s$ e $4000 \mu s$.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,090 \text{ mm}$, $Sp = 2,340 \text{ mm}$;
- configurazione a 4 Elettrodi Passanti;
- corrente iniettata = 250 mA ;

- resistenza di contatto = + 341,37 %;
- velocità di avanzamento = 0,02 mm/s;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

Si noti subito l'incremento relativo alla corrente iniettata. Infatti, la resistenza di contatto è troppo grande rispetto al valore della caduta di potenziale che si misura, rendendo quest'ultima poco o per nulla sensibile ad eventuali oscillazioni se si dovesse mantenere un'iniezione della corrente elettrica a 50 mA. Si aumenta quindi l'ampereaggio da 50 a 250 mA. Durante la prova si eseguono complessivamente cinque rampe di carico con valori incrementali della forza applicata. Purtroppo, il segnale è molto disturbato e le morse della cella di carico sono progettate per carichi massimi di 10 kN, superata tale soglia infatti, il campione scivola creando ulteriore disturbo nelle curve di segnale acquisite.

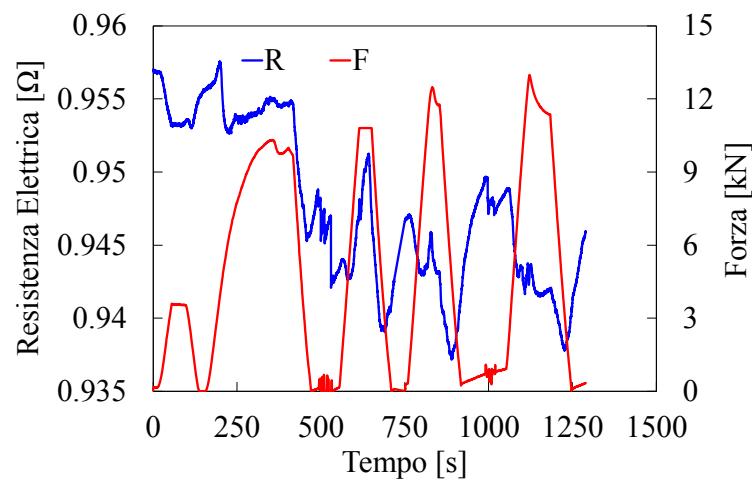


FIG.10.23 Resistenza elettrica e forza di applicazione in funzione del tempo.

Si riescono a raggiungere comunque valori di carico superiori ai 12 kN ma nonostante questo, il trend della resistenza elettrica complessivamente risulta negativo. Tralasciando l'andamento della resistenza elettrica nello specifico di ogni rampa, si osserva una riduzione totale registrata pari all'1,16 %. Si presuppone che eventuali derive positive si possano e si riescono a vedere solo danneggiando le fibre a 0°, responsabili dell'elevata conducibilità elettrica lungo la direzione di misura.

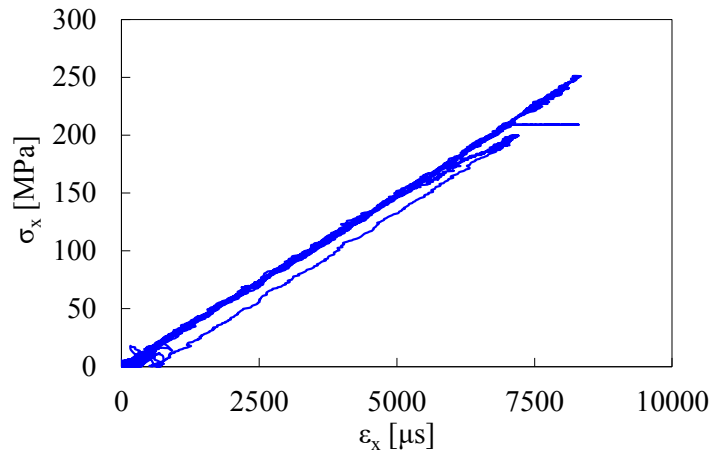


FIG.10.24 Curve ingegneristiche, sforzo in funzione della deformazione longitudinale.

Osservando i trend delle curve ingegneristiche, in Figura 10.24, non si notano grandi spostamenti. Si decide quindi di utilizzare il medesimo campione per una prova a flessione aspettandosi un comportamento simile ai provini $[+60_3/-60_3]_s$, ossia una maggiore sensibilità nel campo dei macro danneggiamenti.

10.6 Rampe di carico a flessione con cablaggio a 4 elettrodi passanti

Si procede dunque con il medesimo provino, cercando di delaminarlo ed osservarne positivamente, in termini di resistenza elettrica, il corrispettivo danneggiamento.

Si eseguono delle rampe di carico in *Controllo Spostamento*, mediante una prova a flessione a tre punti, la distanza tra i due appoggi sottostanti è pari a 52 mm e la spinta viene eseguita dal centro.

Parametri test:

- quote geometriche, $W = 22,090$ mm, $S_p = 2,340$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Passanti;
- corrente iniettata = 250 mA;
- resistenza di contatto = + 363,47 %;
- velocità di avanzamento = 0,1 mm/s;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

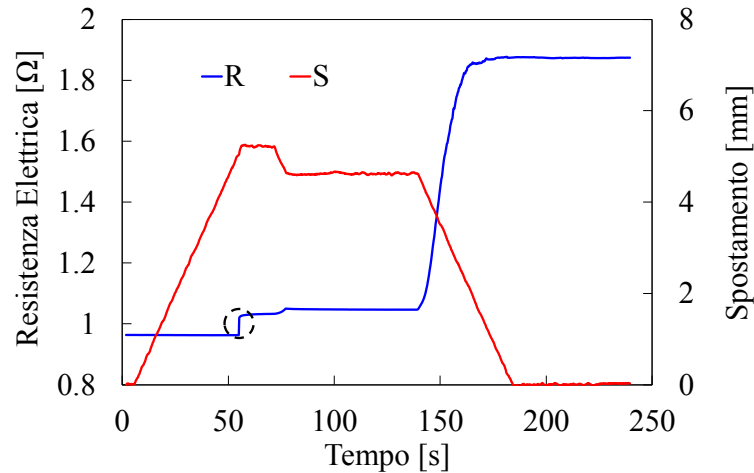


FIG.10.25 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo.

Purtroppo, il campione giunge a rottura nel corso della prima rampa di carico (zona cerchiata in nero).

Si procede a scaricarlo ad intervalli, per osservarne la superficie di danneggiamento. Si nota una rottura completa dello strato a 0° dalla parte delle fibre compresse e corrispettiva delaminazione con gli strati centrali a 90° .

La resistenza elettrica, scaricando il provino, continua ad aumentare perché si è delaminato lo strato superiore del provino e, mentre la cella di carico continua ad esercitare forza, mantiene il *ply* superiore a contatto con la restante parte del campione, ma in condizioni di riposo, il lembo delaminato si solleva completamente, interrompendo qualsiasi contatto elettrico precedente.

Si registra quindi un incremento della resistenza elettrica pari a:

- 7,1 % tra la condizione iniziale e la condizione nominale post rottura, equivalente ad uno spostamento costante pari a 5,2 mm;
- 94,3 % tra la condizione iniziale e la condizione finale di completo scarico.

Infine, come per tutte le prove a flessione eseguite fino ad ora, si osserva il campione ai raggi x.



FIG.10.26 Radiografia laterale del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

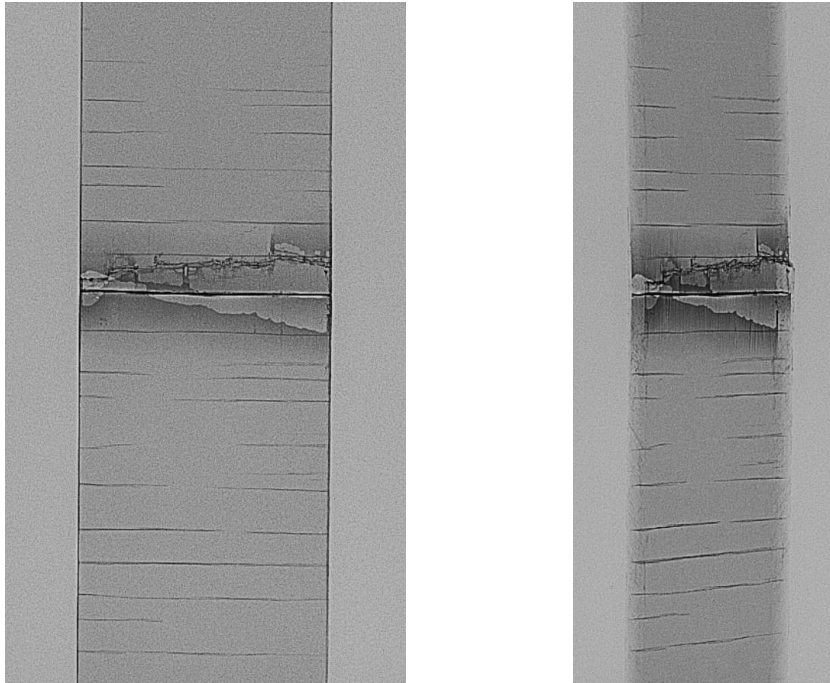


FIG.10.27 Radiografie frontali del campione danneggiato, osservazione della zona delaminata.

10.7 Commenti

A differenza dei test descritti nel capitolo precedente si può osservare come, in generale, la variazione di resistenza elettrica sembri seguire perfettamente l'andamento del carico applicato, viene a mancare quel fenomeno secondo il quale durante il primo tratto di una rampa di carico la resistenza subiva un calo. D'altra parte, la presunta riduzione dell'angolo di *off-axis*, in questo caso non dovrebbe sussistere avendo fibre o parallele o perpendicolari rispetto alla direzione di applicazione del carico. Tuttavia, si può ipotizzare una condizione di inizio carico in cui le fibre a 0° non siano perfettamente orientate lungo la direzione longitudinale; si ricorda infatti che i singoli laminati, quindi taglio e allineamento delle singole lamine, sono stati realizzati manualmente. Rispetto quindi ai laminati $[+60_3/-60_3]_s$ si prova ad ipotizzare una condizione opposta, ossia valutare tramite *CLT* elettrica l'angolo di *off-axis* iniziale tale per cui un perfetto riallineamento delle fibre a 0° garantisca una riduzione di resistività elettrica pari a quella misurata nei test precedenti.

Complessivamente si registrano le seguenti riduzioni di resistenza elettrica:

- - 0,74 % (rampe di carico a trazione, Paragrafo 10.3);
- - 1,33 % (prova ciclica a trazione, Paragrafo 10.4);
- - 1,16 % (rampe di carico a trazione, Paragrafo 10.5).

Si considerano inoltre i reali valori di resistività in piano del materiale in esame:

$$\eta_1 = 0,059 \Omega \cdot \text{mm}$$

$$\eta_2 = 64,4 \Omega \cdot \text{mm}$$

Implementando dunque la *CLT* elettrica, si calcolano i valori effettivi di riduzione dell'angolo di *off-axis* di inizio prova, necessari per garantire delle riduzioni di resistività pari ai valori riportati precedentemente. Analizzando solo le condizioni limite e tralasciando il valore intermedio si ottiene che:

- una riduzione di resistività dello 0,74 % equivarrebbe ad un angolo di *off-axis* iniziale pari a circa quattro gradi, nello specifico corrisponderebbe ad una variazione del *lay-up* da $[4,02_2/90_4]_s$ a $[0_2/90_4]_s$;
- una riduzione di resistività dell'1,33 % equivarrebbe ad un angolo di *off-axis* iniziale pari a circa cinque gradi, nello specifico corrisponderebbe ad una variazione del *lay-up* da $[5,39_2/90_4]_s$ a $[0_2/90_4]_s$.

Quindi, visti gli angoli di riduzione calcolati, non sembra plausibile pensare che ci possa essere un disallineamento iniziale delle fibre, inteso come angolo di *off-axis* delle fibre a 0° , rispetto alla condizione ideale di allineamento lungo la direzione longitudinale del laminato. Tuttavia, a tal proposito, in letteratura si notano effetti di riallineamento delle fibre ma in questo caso inteso come una redistribuzione delle fibre perfettamente rettilinea, ma questo effetto, seppur plausibile, è di difficile rilevazione e conferma.

Per finire, come per il capitolo precedente, le prove più significative risultano essere quelle a flessione, ma in questo caso si ha meno controllo sul cedimento degli strati a 0° che si manifesta in maniera istantanea. Per di più, si può affermare che, fin tanto che non si rompono le fibre a 0° , qualsiasi tipo di danneggiamento interno, con materiale e strumenti a disposizione, non è rilevabile poiché si presuppone che la corrente si distribuisca sempre e comunque nelle lamine che garantiscono una minore opposizione al flusso di corrente stesso, ossia quelle a 0° .

10.8 Referenze

- [26] Kazuomi Omagari, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, *Detection of Matrix Cracking of CFRP Using Electrical Resistance Changes*, Key Engineering Materials, 297-300, 2005, p.2096-2101.

HEALTH MONITORING CON PROVINI TESTATI A FLESSIONE

11.1 Introduzione

Visti i risultati ottenuti con le prove descritte nei due capitoli precedenti, si decide di considerare come test utili solamente quelli con sollecitazioni flessionali. Ma per le prove a flessione, condotte secondo delle rampe di carico, si sono ottenuti dei macro-danneggiamenti, i provini infatti erano stati altamente deformati. Ora si vuole porre l'attenzione a ciò che succede nelle primissime rampe, cercando quindi di valutare eventuali incrementi di resistenza elettrica, prima di giungere a delaminazioni complete o comunque a macro-deformazioni. Si sottopongono quindi i singoli provini ad una singola, o al massimo due, rampe di carico, interrompendo i test non appena si percepisce un minimo danneggiamento ed una corrispettiva risalita della corrente elettrica. Successivamente si cercherà di qualificare il danneggiamento e, confrontandolo con il reale incremento di resistenza, valutarne la proporzionalità.

I provini testati hanno *lay-up* pari a $[+60_3/-60_3]_s$, ritenendo di avere un maggior controllo rispetto ai *cross-ply*. In una seconda fase, si riporteranno anche alcune prove con provini in tessuto di fibra di carbonio, dei quali si accenna brevemente il materiale nel paragrafo successivo.

11.2 Caratterizzazione tessuto in fibra di carbonio

Si descrive brevemente il materiale utilizzato per le ultime prove del suddetto lavoro di tesi. Si tratta di un tessuto in fibra di carbonio pre-impregnato con resina epossidica nano modificata per mezzo di nanotubi di carbonio. Si realizza un laminato sovrapponendo complessivamente quattro strati di materiale. Si utilizza uno stampo in vetro delle dimensioni di 29 cm per 38 cm. L'iter procedurale è il medesimo descritto nel Capitolo 8 (Paragrafi 8.1-8.2). In Figura 11.1 si riporta il ciclo di cura in autoclave utilizzato per la realizzazione del laminato. Dal confronto con il grafico in Figura 8.18, si osservi nello specifico un setup di temperatura inferiore di 20° ed un inizio anticipato della pressurizzazione della camera dell'autoclave.

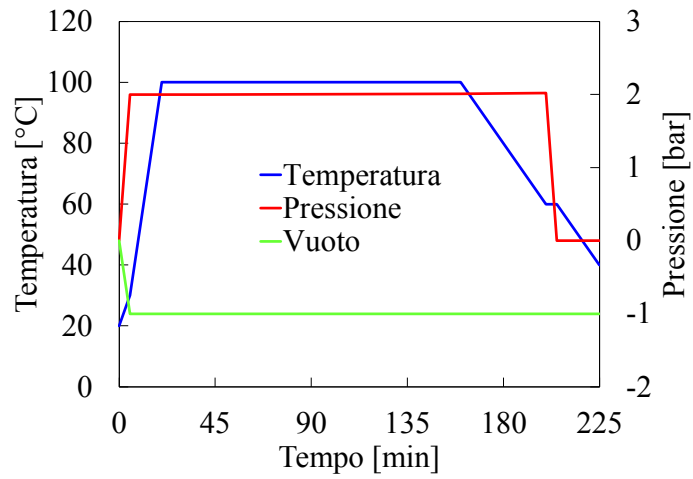


FIG.11.1 Ciclo di cura in autoclave.

Post troncatura e lucidatura dei provini, si osserva il materiale al microscopio ottico per caratterizzarlo morfologicamente. Si riportano di seguito alcune micrografie.

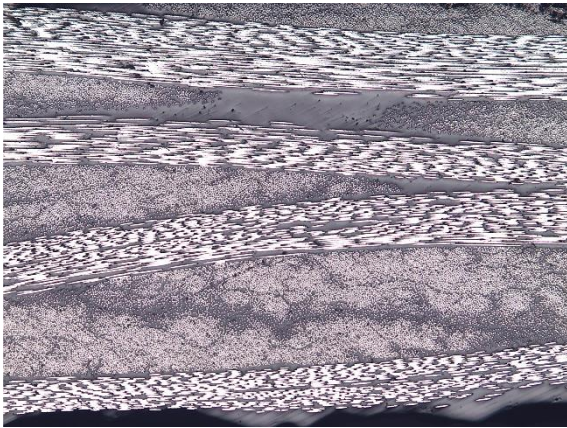


FIG.11.2 Micrografia tessuto – 50x.

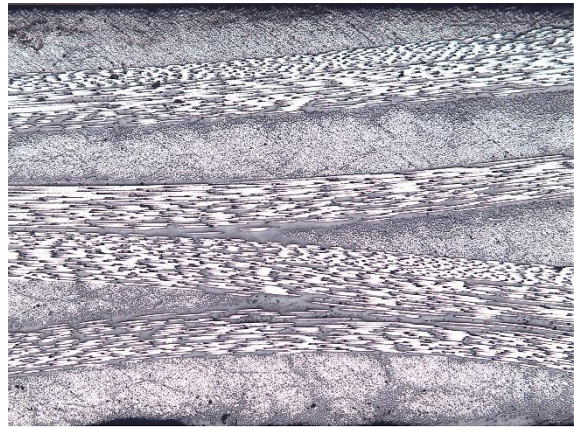


FIG.11.3 Micrografia tessuto – 50x.

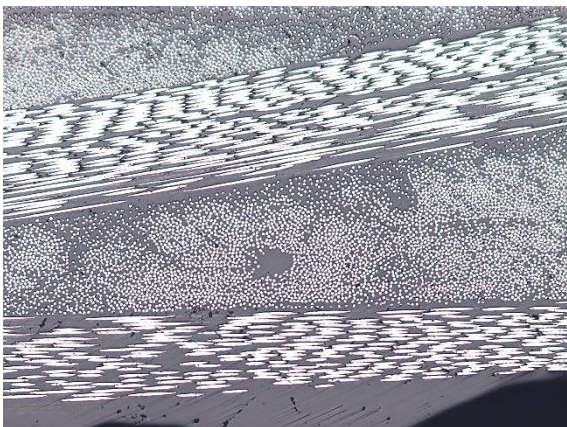


FIG.11.4 Micrografia tessuto – 100x.

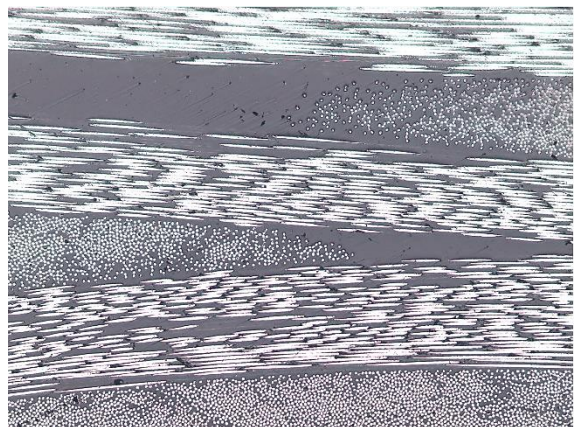


FIG.11.5 Micrografia tessuto – 100x.

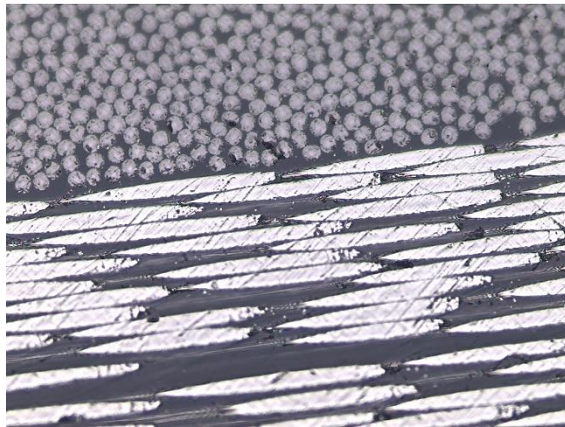


FIG.11.6 Micrografia tessuto – 500x.

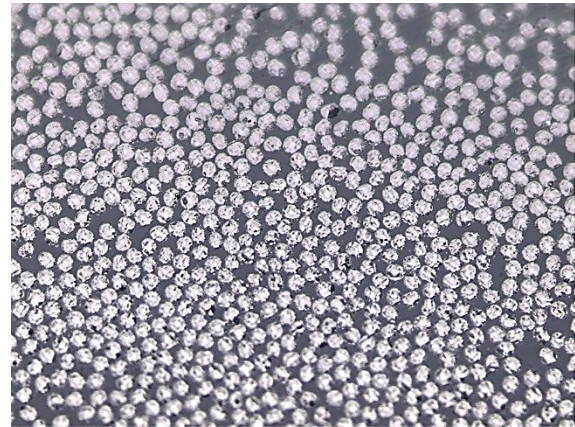


FIG.11.7 Micrografia tessuto – 500x.

Come si può osservare dalle micrografie in esame, rispetto al materiale precedente, la distribuzione di fibre sembra più elevata. Vi sono solamente alcune zone costituite da matrice epossidica, prive di fibre di carbonio, ma complessivamente non si rilevano vuoti né mazzetti di fibre di materiale non noto.

Prima dei test si conclude quindi caratterizzando il materiale da un punto di vista elettrico. Si riportano solamente i risultati ottenuti, avendo implementato gli stessi passaggi descritti nel Paragrafo 8.7, del quale si consiglia la consultazione. Dal laminato realizzato si ricavano dei provini troncando lo stesso con un'angolazione pari a 0° 45° e 90° per ricavarsi le tre direzioni principali di misura necessarie per la caratterizzazione. Per la misurazione della conducibilità elettrica, lungo la direzione dello spessore, si utilizzano sempre tre pezzettini di laminato ricavati dalle estremità dei provini precedentemente ottenuti.

Codice Provino	Misurazioni Geometriche				Misurazioni Elettriche			
	t [mm]	w [mm]	d _{AB} [mm]	d _{BC} [mm]	I [mA]	ΔV _{AB} [mV]	ΔV _{BC} [mV]	ΔV _{AC} [mV]
I.P. - 00	1.8	20.75	50	50	250	24.35	22.95	47.31
I.P. - 45	1.8	21.95	50	50	250	198.80	197.30	396.30
I.P. - 90	1.8	20.45	50	50	250	26.95	27.68	54.34

TAB.11.1 Misurazioni *In-Plane* tessuto.

Codice Provino	Resistività [$\Omega \cdot m$]			Conducibilità [S/m]		
	η_{AB}	η_{BC}	η_{AC}	σ_{AB}	σ_{BC}	σ_{AC}
I.P. - 00	7.28E-05	6.86E-05	7.07E-05	1.37E+04	1.46E+04	1.41E+04
I.P. - 45	6.28E-04	6.24E-04	6.26E-04	1.59E+03	1.60E+03	1.60E+03
I.P. - 90	7.94E-05	8.15E-05	8.00E-05	1.26E+04	1.23E+04	1.25E+04

TAB.11.2 Risultati *In-Plane* tessuto.

Codice Provino	Misurazioni Geometriche			Misurazioni Elettriche	
	t [mm]	w ₁ [mm]	w ₂ [mm]	I [mA]	ΔV [mV]
O.O.P. - 1	1.8	21.05	21.00	10	26.70
O.O.P. - 2	1.8	20.55	20.50	10	25.70
O.O.P. - 3	1.8	20.00	21.30	10	25.03

TAB.11.3 Misurazioni *Out-of-Plane* tessuto.

Codice Provino	Resistività [$\Omega \cdot m$]	Conducibilità [S/m]
	η	σ
O.O.P. - 1	6.56E-01	1.53E+00
O.O.P. - 2	6.01E-01	1.66E+00
O.O.P. - 3	5.92E-01	1.69E+00
MEDIA	6.17E-01	1.63E+00
dev.st	0.03	0.09
cov.%	5.55	5.40

TAB.11.4 Risultati *Out-of-Plane* tessuto.

Si riportano infine, i rapporti del valor medio di conducibilità *out-of-plane*, con i valori *in-plane* valutati per provini orientati a 0°, 45° e 90°.

$\sigma_{x(00^\circ)} / \sigma_z$	8.71E+03
$\sigma_{x(45^\circ)} / \sigma_z$	9.82E+02
$\sigma_{x(90^\circ)} / \sigma_z$	7.69E+03

TAB.11.5 Rapporti di conducibilità elettrica *In-Plane* e *Out-of-Plane*.

Dalla Tabella 11.2 si osservi come, da un punto di vista elettrico, il laminato abbia un comportamento del tutto simile lungo la direzione a 0° e 90°. Inoltre, dal confronto della Tabella 11.5 con la Tabella 8.13, si denota una riduzione del grado di ortotropia elettrica pari ad un ordine di grandezza.

11.3 Preparazione dei provini e dei test

Per tutti i test in esame si eseguono dunque delle prove a flessione a tre punti; la distanza tra i due appoggi sottostanti è pari a 52 mm e la spinta viene eseguita dal centro. Tutte le analisi vengono eseguite in *Controllo Spostamento* con campioni cablati secondo una configurazione a quattro elettrodi opposti. Di seguito è possibile osservarne geometria e configurazione.

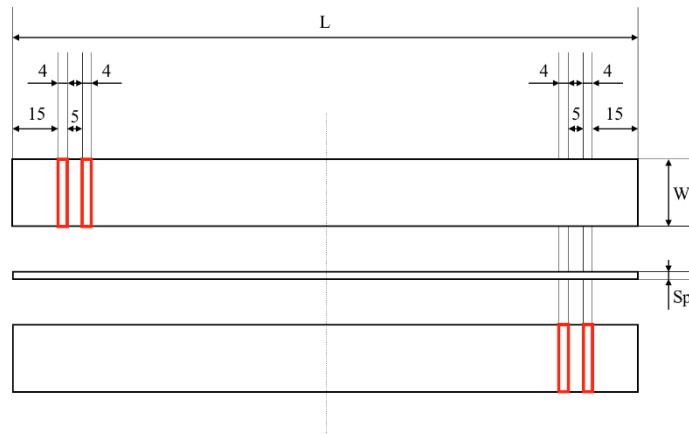


FIG.11.8 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A) – Geometria.

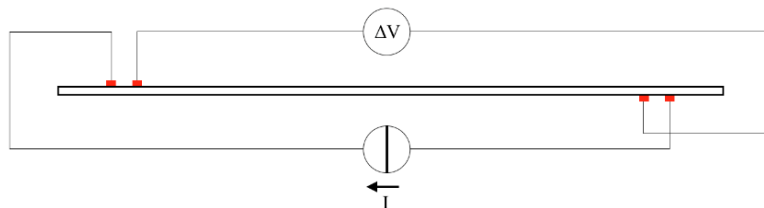
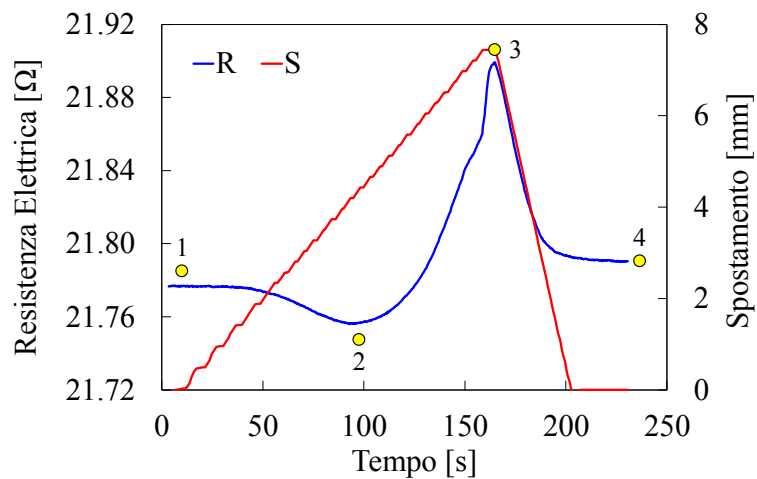


FIG.11.9 Configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A) - Collegamenti Elettrici.

Parametri test:

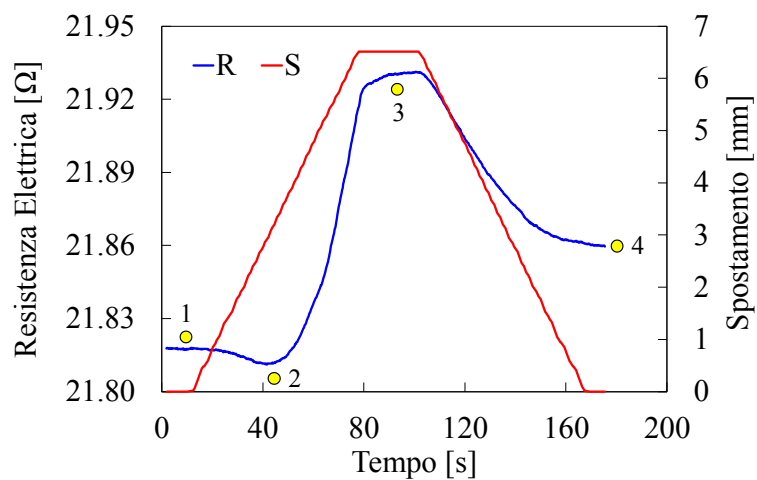
- quote geometriche:
 - $\pm 60^\circ$: $L = 206$ mm, $W = 20,750$ mm, $Sp = 2,284$ mm;
 - tessuto: $L = 185$ mm, $W = 18,621$ mm, $Sp = 1,782$ mm;
- configurazione a 4 Elettrodi Opposti (variante A);
- corrente iniettata = 50 mA ($\pm 60^\circ$) ~ 250 mA (tessuto);
- velocità di avanzamento = 0,05 mm/s ~ 0,10 mm/s;
- frequenza di acquisizione dati = 5 Hz.

11.4 Risultati provini [+60₃/-60₃]_s



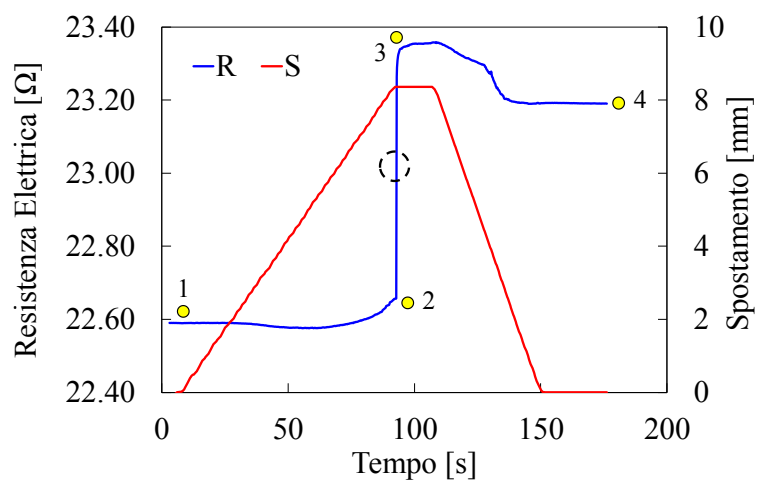
Δ_{12} [%]	-0.095
Δ_{13} [%]	0.563
Δ_{14} [%]	0.063

FIG.11.10 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 01.



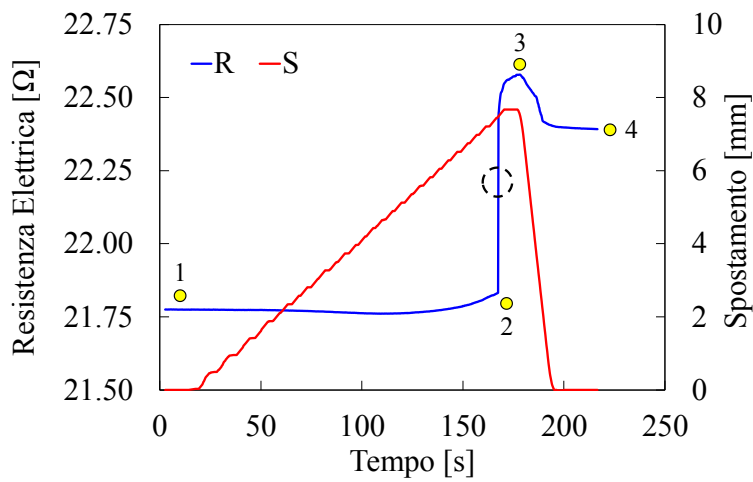
Δ_{12} [%]	-0.030
Δ_{13} [%]	0.521
Δ_{14} [%]	0.192

FIG.11.11 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 02.



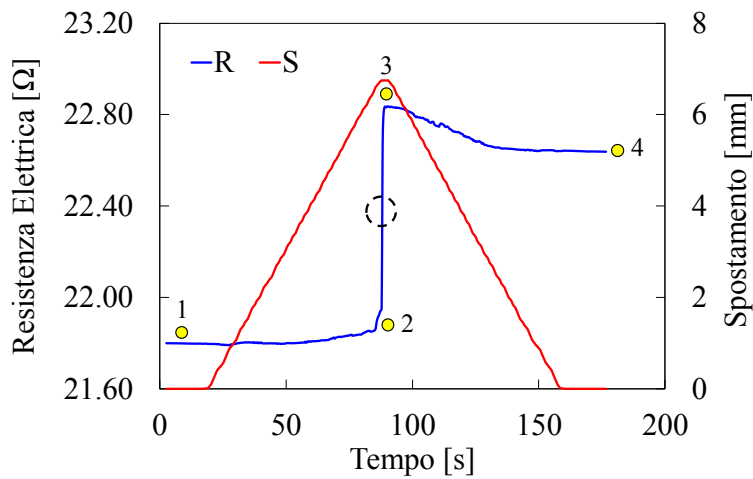
Δ_{12} [%]	0.295
Δ_{23} [%]	3.095
Δ_{14} [%]	2.656

FIG.11.12 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 03



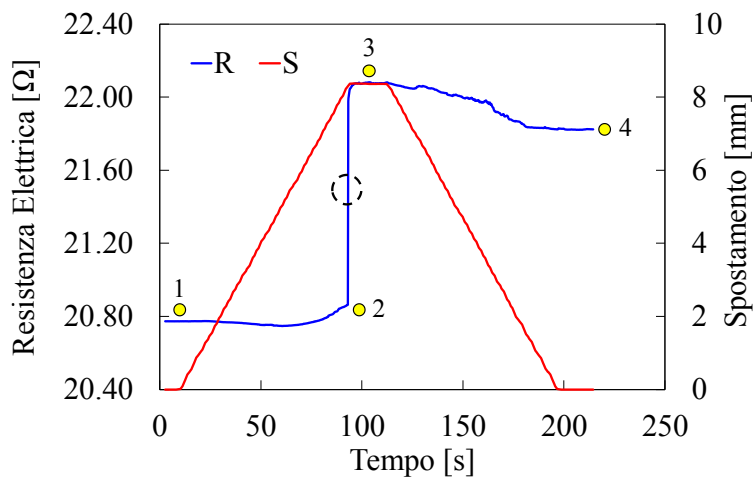
Δ_{12} [%]	0.265
Δ_{23} [%]	3.415
Δ_{14} [%]	2.832

FIG.11.13 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 04.



Δ_{12} [%]	0.691
Δ_{23} [%]	4.043
Δ_{14} [%]	3.850

FIG.11.14 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 05.



Δ_{12} [%]	0.433
Δ_{23} [%]	5.834
Δ_{14} [%]	5.054

FIG.11.15 Resistenza elettrica e spostamento in funzione del tempo – Provino 06.

Come è possibile osservare dai grafici precedenti, si riportano i risultati in ordine crescente di variazione della resistenza elettrica. Nello specifico, si calcolano tutte le variazioni percepite, numerate in ordine temporale. Per alcuni provini però, non è stato possibile interrompere la prova prima che il campione iniziasse a delaminare poiché, la variazione di resistenza elettrica risultava impercettibile. Quindi, a delaminazione avvenuta, si nota un incremento istantaneo della resistenza elettrica (zona cerchiata in nero) poi parzialmente recuperato in condizioni di completo scarico.

Per valutare la causa relativa a ciascun incremento finale di resistenza elettrica, si prova a qualificare il danneggiamento sottoponendo ogni singolo provino ai raggi x, e riportando le radiografie ottenute secondo il medesimo ordine, dei grafici appena descritti.

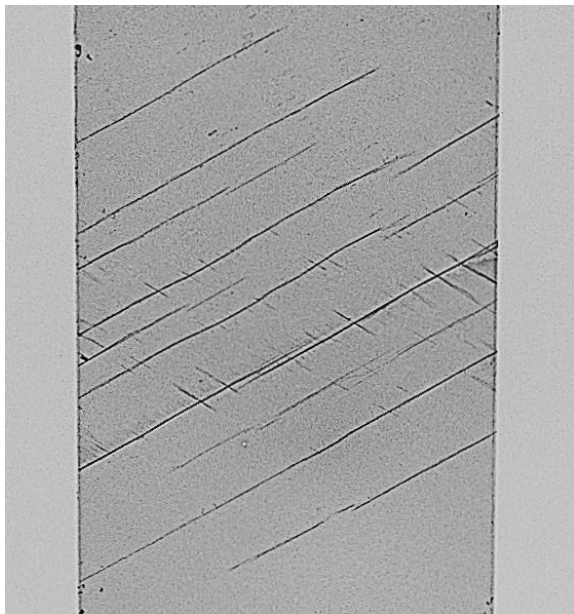


FIG.11.16 Radiografia frontale – Provino 01.

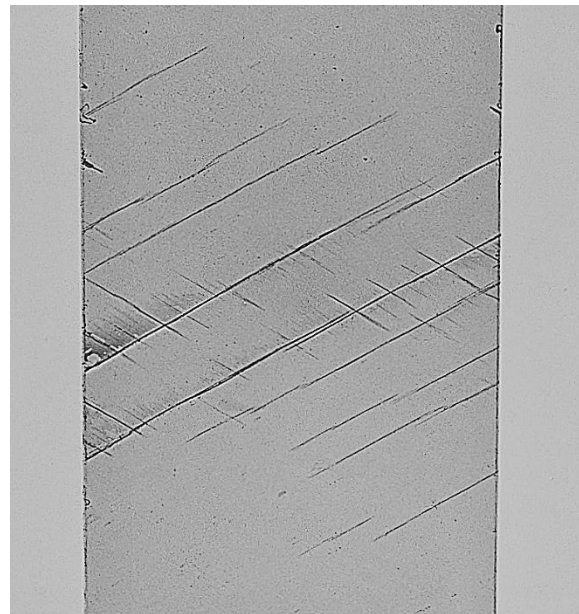


FIG.11.17 Radiografia frontale – Provino 02.

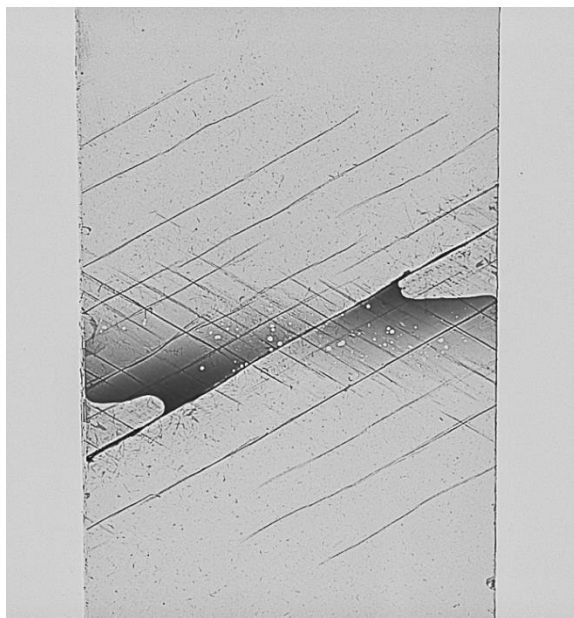


FIG.11.18 Radiografia frontale – Provino 03.

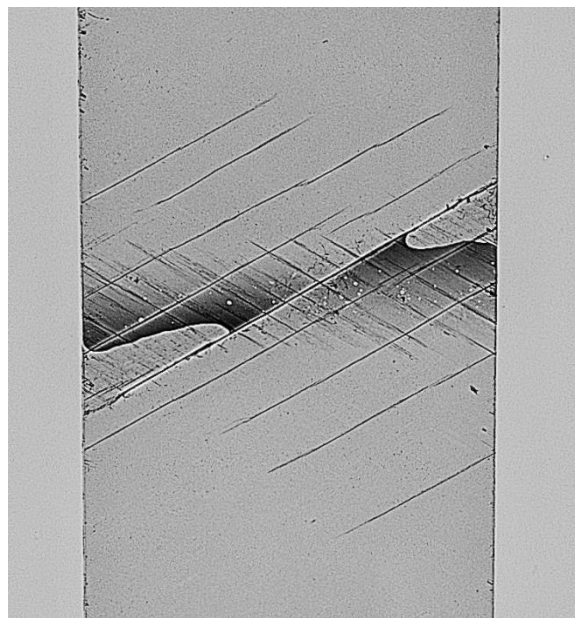


FIG.11.19 Radiografia frontale – Provino 04.



FIG.11.20 Radiografia Frontale – Provino 05.



FIG.11.21 Radiografia Frontale – Provino 06.

Si noti come il liquido di contrasto riesca a penetrare in maniera progressiva, a sottolineare il danneggiamento crescente dal provino 01 fino al provino 06. Per qualificare meglio la zona delaminata, si riportano anche le corrispettive radiografie in vista laterale, dalle quali si può osservare un aumento graduale dei lembi delaminati, relativi agli strati inferiori dei campioni, in corrispondenza delle fibre tese.

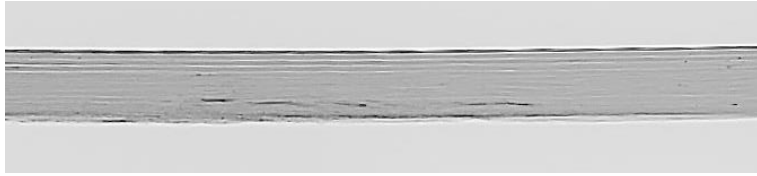


FIG.11.22 Radiografia laterale – Provino 01.

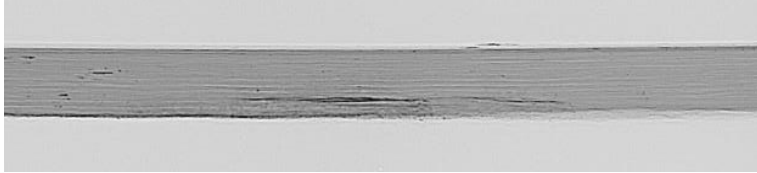


FIG.11.23 Radiografia laterale – Provino 02.



FIG.11.24 Radiografia laterale – Provino 03.

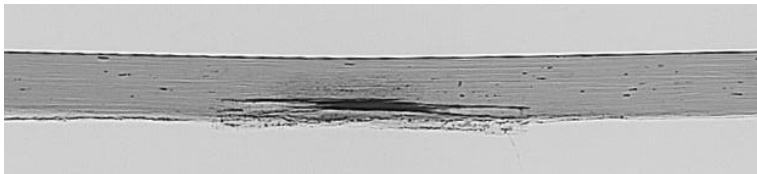


FIG.11.25 Radiografia laterale – Provino 04.

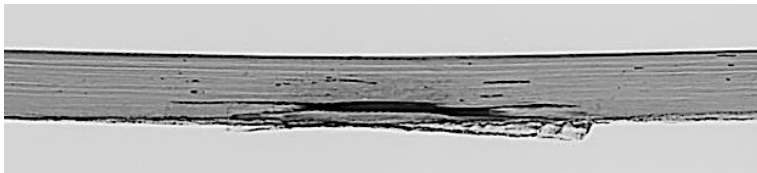


FIG.11.26 Radiografia laterale – Provino 05.



FIG.11.27 Radiografia laterale – Provino 06.

11.5 Risultati provini con tessuto in fibra di carbonio

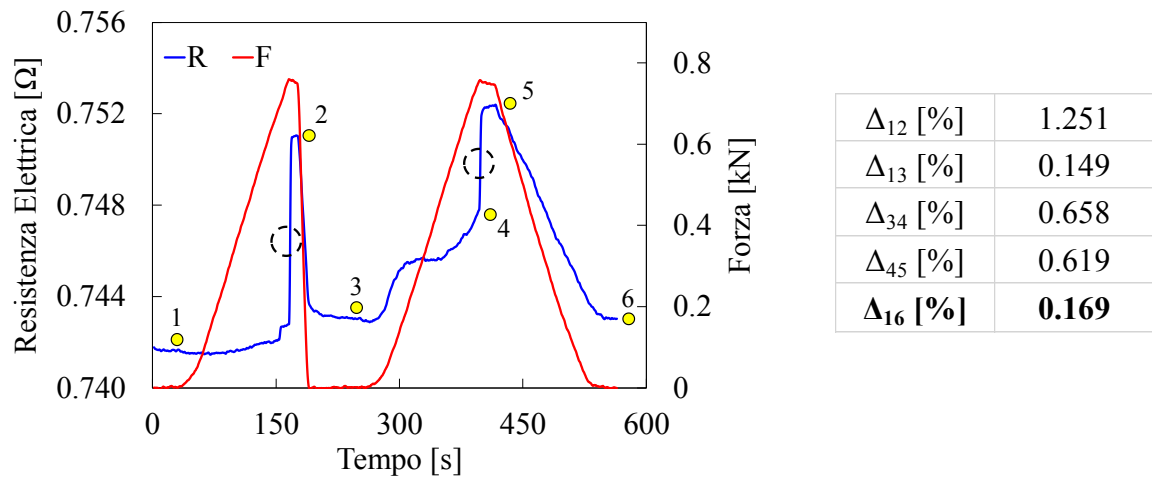


FIG.11.28 Resistenza elettrica e forza applicata in funzione del tempo – Provino 01.

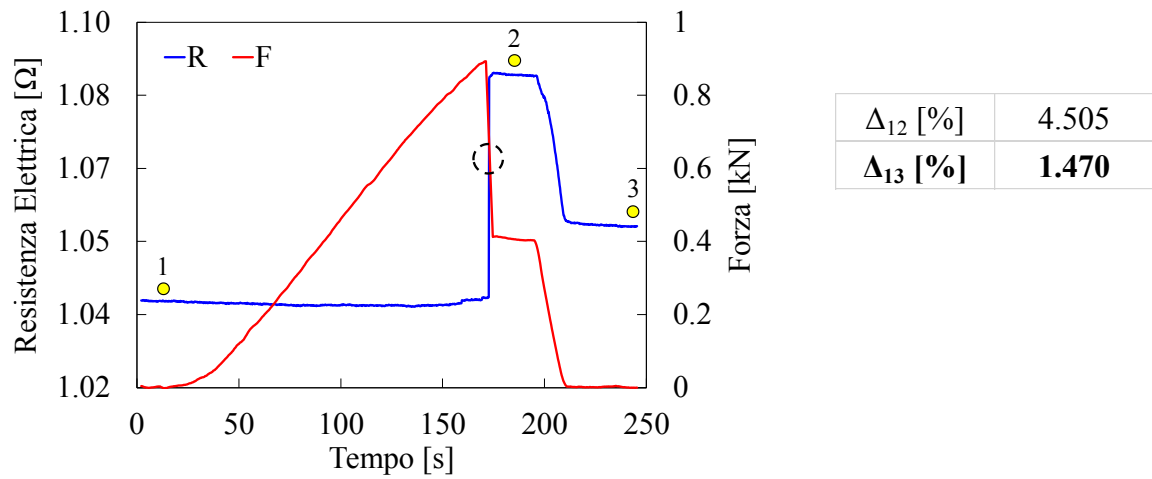


FIG.11.29 Resistenza elettrica e forza applicata in funzione del tempo – Provino 02.

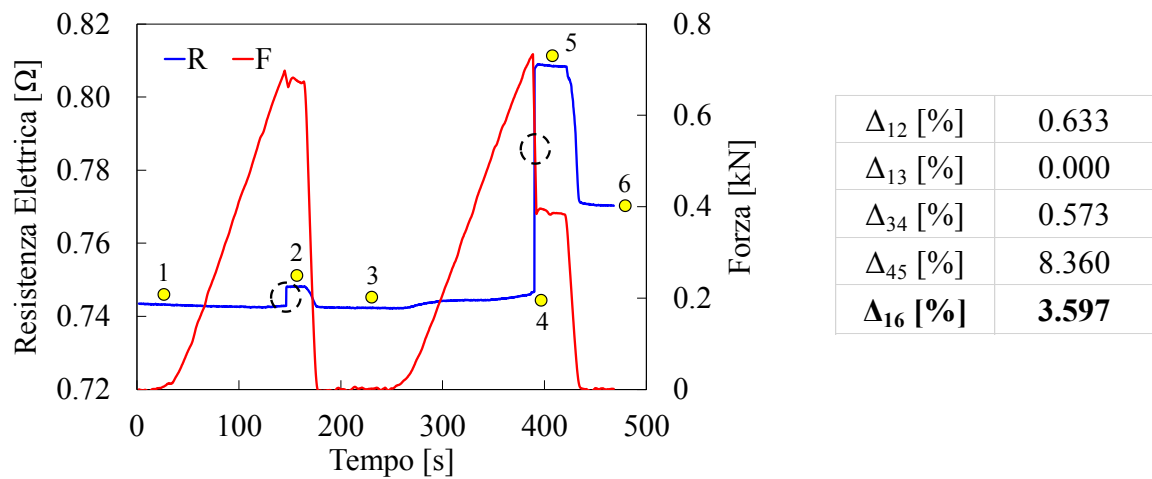


FIG.11.30 Resistenza elettrica e forza applicata in funzione del tempo – Provino 03.

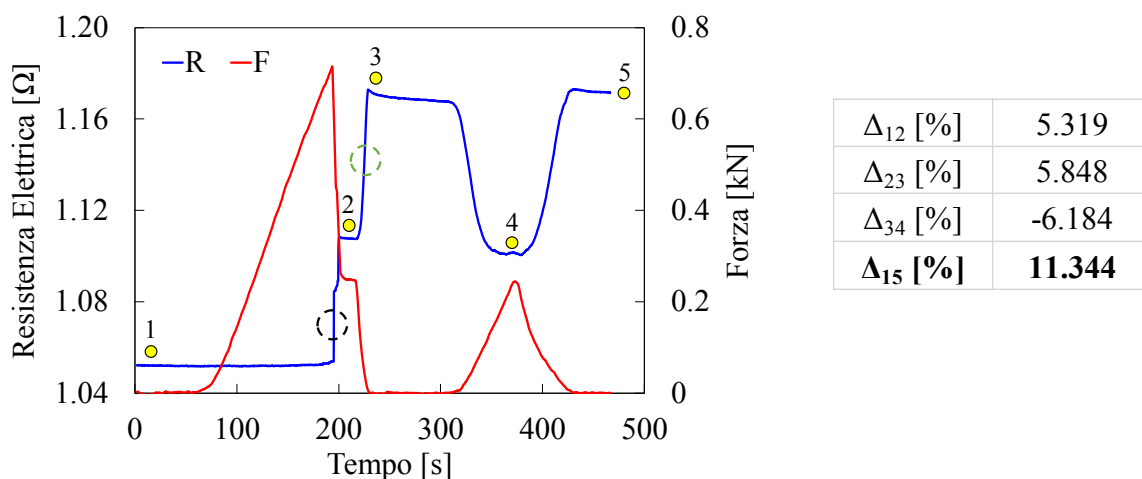


FIG.11.31 Resistenza elettrica e forza applicata in funzione del tempo – Provino 04.

Come per i campioni precedenti, anche per i quattro provini in esame si riportano i risultati in ordine crescente di variazione della resistenza elettrica. Nello specifico si calcolano tutte le variazioni percepite, numerate in ordine temporale. Trattandosi delle prime prove con il materiale in analisi, in alcuni test si eseguono due rampe di carico per valutarne il comportamento. Si sono cerchiato in nero quelle zone in cui si è percepito un salto istantaneo della resistenza elettrica, presumibilmente giustificabile con l'insorgere di una o più delaminazioni. L'unico comportamento anomalo, rispetto a tutte le storie di carico, riguarda la zona cerchiata in verde in Figura 11.31, dove, in fase di scarico si percepisce un ulteriore aumento della resistenza elettrica misurata. Si noter  dalle micrografie e radiografie successive, una rottura delle fibre e corrispettiva delaminazione dalla parte delle fibre compresse, pertanto, scaricando il provino, si solleva il lembo delaminato interrompendo qualsiasi collegamento elettrico in quella zona. Mentre, ricaricando il provino, la cella di carico spinge nuovamente il lembo in contatto con il campione, ripristinando i collegamenti precedentemente interrotti, riducendo dunque la resistenza elettrica complessiva.

Infine, sempre per valutare la causa relativa a ciascun incremento finale di resistenza elettrica, si prova a qualificare il danneggiamento sottoponendo ogni singolo provino ai raggi x, e riportando le radiografie ottenute secondo il medesimo ordine dei grafici appena descritti. Si sottolinea come, larghezza, per le radiografie frontali, e spessore, per le radiografie laterali, siano i medesimi per tutte le immagini riportate in modo da avere un confronto diretto, garantendo la medesima scala a livello d'immagine.



FIG.11.32 Radiografia frontale – Provino 01.



FIG.11.33 Radiografia frontale – Provino 02.

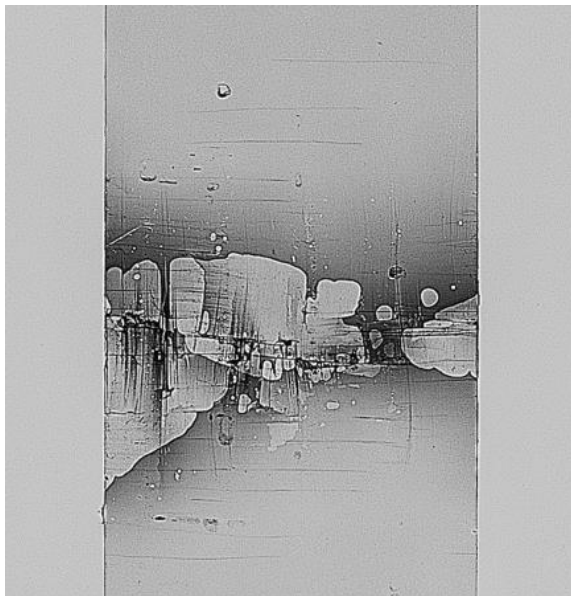


FIG.11.34 Radiografia frontale – Provino 03.

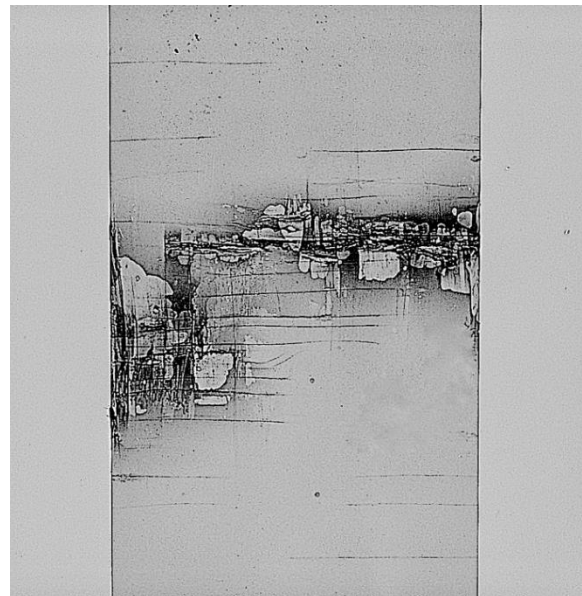


FIG.11.35 Radiografia frontale – Provino 04.

Ancora una volta, si noti come il liquido di contrasto riesca a penetrare in maniera progressiva, a sottolineare il danneggiamento crescente dal provino 01 fino al provino 04. Per qualificare meglio la zona delaminata, si riportano anche le corrispettive radiografie in vista laterale.

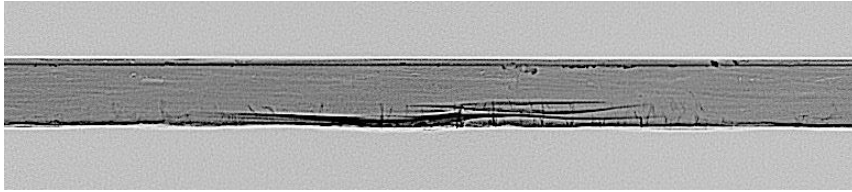


FIG.11.36 Radiografia laterale – Provino 01.

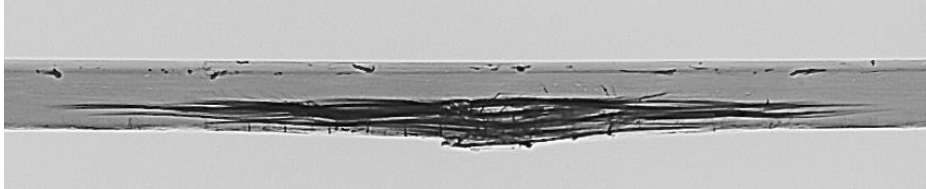


FIG.11.37 Radiografia laterale – Provino 02.

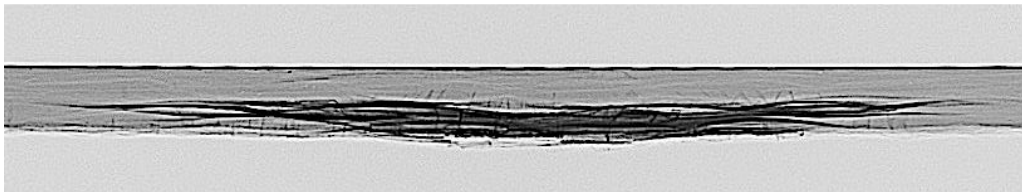


FIG.11.38 Radiografia laterale – Provino 03.

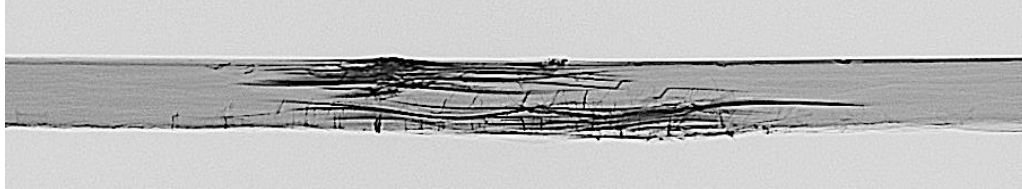


FIG.11.39 Radiografia laterale – Provino 04.

Infine, si osservano i quattro campioni al microscopio ottico, collezionando una serie di micrografie a 50 ingrandimenti, successivamente auto-adattate e incollate assieme per realizzare delle panoramiche, mediante il software Kolor Autopano.

A differenza delle radiografie precedenti, le micrografie non vengono riportate usando la medesima scala, altrimenti il danneggiamento non sempre sarebbe percettibile, come per l'immagine 11.40, dove si nota uno spessore del provino sensibilmente maggiore se confrontato con le restanti tre micrografie.

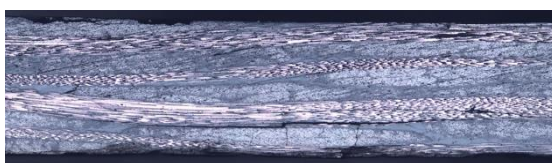


FIG.11.40 Micrografia laterale – Provino 01.

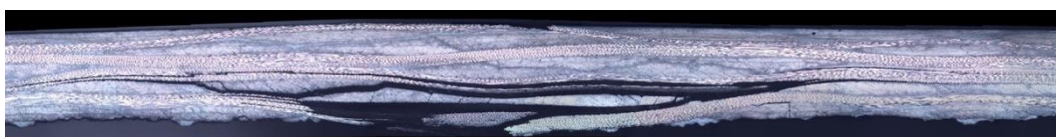


FIG.11.41 Micrografia laterale – Provino 02.



FIG.11.42 Micrografia laterale – Provino 03.

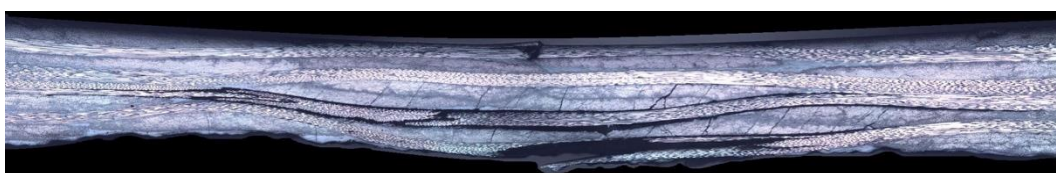


FIG.11.43 Micrografia laterale – Provino 04.

Si noti come all'aumentare della resistenza registrata, non solo aumentino le zone delaminate, ma compaiano sempre più cricche matriciali, garantendo un'ostruzione pressoché completa al flusso di corrente elettrica.

11.6 Commenti

Complessivamente i risultati ottenuti sono in linea con le aspettative. Tuttavia, sembra che si riescano a percepire solamente danneggiamenti consistenti che portino a delaminazioni complete o rotture delle fibre. Infatti, nelle uniche due prove dove si riesce ad interrompere il test prima che il campione delamini completamente, gli incrementi di resistenza elettrica raggiungono un massimo dello 0,19 % (Figura 11.11) dove comunque, dalla radiografia in Figura 12.23, si nota già un innesco di delaminazione. Mentre, se si sollecita il provino fermandosi a deformazioni meno marcate, le variazioni di resistenza elettrica sono del tutto impercettibili.

Invece, nel caso in cui il danneggiamento sia cospicuo, i valori registrati sono elevati. Osservando la micrografia in Figura 11.43, si nota come quasi tutto lo spessore sia visibilmente danneggiato, non solo in termini di delaminazioni ma anche di cricche matriciali e rottura delle fibre, il corrispettivo incremento si circonda ad un 11,3 %.

Quindi, per percepire sensibilmente una variazione di resistenza elettrica, che sia mantenuta tale anche nella condizione di riposo del campione, l'unica soluzione è giungere ad una delaminazione completa o rottura parziale delle fibre, uniche situazioni in cui il salto di resistenza elettrica avviene istantaneamente, com'è possibile osservare in tutte le zone circoscritte da un tratteggio nero circolare.

CONCLUSIONI

12.1 Valutazione dei risultati

Inizialmente è possibile fare alcune considerazioni in merito ai risultati ottenuti e i risultati osservati in letteratura, confrontandone anche metodologie di esecuzione.

Per quanto riguarda la fase di preparazione dei provini, le superfici di contatto sono sempre state opportunamente lucidate e trattate con vernice argentata, svincolando dalle misure la possibilità di incorrere in valori negativi di *gage factor*, durante una singola rampa di carico, pre-danneggiamento del materiale.

Infatti, Angelidis et al [1] analizzando i risultati ottenuti, a seguito di prove statiche di trazione, in funzione del trattamento che subiscono le superfici sulle quali andranno poi posizionati gli elettrodi, registrano valori di k negativi qualora gli elettrodi vengano trattati con vernice a base carbonio anziché vernice argentata.

L'utilizzo della misura a quattro punti sembra essere la soluzione ideale nel momento in cui si vuole svincolare l'influenza della resistenza di contatto dalle misure. Tuttavia, come si può osservare dai primi due test condotti con provini $\pm 60^\circ$ (Paragrafo 9.2 e Paragrafo 9.3), nei quali si è ricaduti ad una prova a due elettrodi (per alimentazione e misura simultaneamente), la resistenza elettrica complessivamente è calata. Quindi, qualora la resistenza di contatto dovesse influenzare le misure, ci si aspetta che il collegamento tra la superficie del provino, la vernice e l'elettrodo, degradi con il tempo, causando un incremento di R_c e dunque un corrispettivo aumento della variazione della resistenza elettrica.

Osservando i risultati riportati da Vavouliotis et al. [2], si potrebbe dedurre che i test che hanno ottenuto una riduzione complessiva della variazione della resistenza elettrica, siano stati interrotti troppo presto, e che la riduzione sia stata determinata appunto da un incremento di temperatura del campione stesso. Implementando pertanto le equazioni 1.7a e 1.7c [2], che relazionano la variazione della resistenza elettrica in funzione di un cambiamento di temperatura, per materiali in *CFRP* con matrice epossidica dopata, si

sarebbero dovute ottenere variazioni di temperatura, necessarie per garantire le riduzioni di resistenza registrate, fino a 3,5°C.

Si deve considerare comunque, che il materiale ha subito un danneggiamento, ed aspettandosi un aumento della resistenza elettrica, il salto complessivo determinato dalla temperatura dovrebbe essere ancora maggiore. Inoltre, con alcuni campioni, si è misurata la resistenza elettrica a distanza di qualche giorno dall'esecuzione dei test, ed il valore risultava essere il medesimo riscontrato a fine prova. Se la riduzione della resistenza elettrica fosse stata determinata dalla temperatura, si sarebbe dovuto registrare un incremento di resistenza elettrica a provino raffreddato. Infine, le riduzioni di resistenza più consistenti sono state osservate con delle prove a rampe di carico. Non è plausibile pensare che si scaldi di più un provino che subisce quattro rampe di carico (Paragrafo 9.4, $(\Delta R/R_0)_{\max} = 3,44 \% \rightarrow \Delta T = 3,16^\circ\text{C}$) rispetto ad un provino testato a fatica per 48000 cicli (Paragrafo 9.5, $(\Delta R/R_0)_{\max} = 0,44 \% \rightarrow \Delta T = 0,89^\circ\text{C}$).

Per il posizionamento degli elettrodi, complessivamente sono state utilizzate tre configurazioni generali:

1. posizionamento dei contatti sulla stessa superficie, ottenendo maggiore sensibilità in piano;
2. posizionamento dei contatti sulle due superfici opposte rispetto allo spessore dei campioni, ottenendo maggiore sensibilità nella direzione dello spessore stesso, prima che si manifesti il danneggiamento;
3. posizionamento dei contatti su tutte le superfici del provino (elettrodi circolari), ottenendo complessivamente una buona sensibilità sia in piano sia fuori piano, in particolar modo a seguito dell'insorgere del danneggiamento.

Come già sottolineato, l'effetto piezoresistivo del materiale analizzato, con provini *CFRP cross-ply*, conferma un *gage factor* del medesimo ordine di grandezza riscontrato in letteratura [3], con provini unidirezionali in *CFRP*.

Per finire, inizialmente sembrava che l'utilizzo di corrente continua fosse più idoneo per il monitoraggio della rottura delle fibre, mentre l'utilizzo di corrente alternata fosse più idoneo per *debonding*, delaminazioni e cricche trasversali. Tuttavia, ripercorrendo i test eseguiti con singole rampe di carico descritti nel corso del Capitolo 11, la trattazione analizza nello specifico l'insorgere di delaminazioni, per le quali si è cercato appunto di

definire un iter di progressione in termini di danneggiamento e corrispettivo incremento della resistenza elettrica misurata. Si sottolinea come, si sia sempre fatto uso di un generatore di corrente continua (*DC*).

Inoltre, come riportano Matsuzaki e Todoroki [4], i risultati ottenuti in corrente continua sono del tutto simili ai corrispettivi valutati per mezzo di un oscillatore ceramico, a discapito di alcuni errori sperimentali e variazioni alla superficie di contatto della zona danneggiata, oltre ad essere del tutto simili con i trend analizzati nel corso del Capitolo 11.

12.2 Considerazioni finali

Dai modelli numerici implementati, è emerso che la configurazione ottimale, che dovrebbe garantire una migliore sensibilità nei confronti del danneggiamento, sia circoscritta ad elevati angoli di *off-axis* di tutti i *layer* che costituiscono il laminato. Si ricorda, come la sensibilità al danneggiamento sia intesa come variazione più o meno marcata della resistenza elettrica misurata. Quindi, all'aumentare dell'angolo di orientazione delle fibre, rispetto alla direzione principale del campione, iniettando corrente in direzione longitudinale rispetto al provino, la condizione ideale per ostacolare il flusso di corrente è rappresentata dall'insorgere di cricche nella matrice più trasversali possibile.

Tuttavia, dalla campagna sperimentale svolta, si è dedotto che il materiale subisce un riallineamento delle fibre lungo la direzione di applicazione del carico, con riduzione dell'angolo di *off-axis*. Questo comporta un incremento di conducibilità elettrica a discapito di un decremento della resistenza. Si sottolinea come, questo comportamento sia osservabile in tutte le prove a trazione eseguite, cicliche e quasi statiche. Tale riallineamento può essere permanente o meno, in funzione delle tensioni a cui è sottoposto il provino. Se il riallineamento quindi non è permanente, quando si scarica il campione, le fibre tornano alla loro posizione iniziale ristabilendo quindi il valore di resistenza elettrica di inizio prova. Mentre, se dovesse essere permanente, in condizioni di riposo, le fibre non tornano più alla loro posizione iniziale, garantendo perciò una riduzione della resistenza elettrica. Ciononostante, si sono sempre osservate, a fine prove, cricche matriciali, delaminazioni e *debonding* fibra matrice.

Si ipotizza che il presunto riallineamento delle fibre contribuisca ad una riduzione della resistenza elettrica in contributo maggiore rispetto a quanto dovrebbe aumentare per eventuali danneggiamenti.

La riduzione dell'angolo di *off-axis*, con redistribuzione delle fibre lungo la direzione di applicazione del carico, quindi, sembra surclassare il monitoraggio del danneggiamento, oggetto dei test, eseguiti secondo delle prove a trazione.

Invece, con sollecitazioni di flessione, complessivamente i risultati ottenuti sono in linea con le aspettative e confermate dalla letteratura. Si riescono a percepire danneggiamenti pre e post delaminazioni complete o rotture delle fibre. Si riportano successivamente gli intervalli incrementali, di variazione elettrica, registrati per campioni aventi *lay-up* pari a $[+60_3/-60_3]_s$:

- pre-delaminazioni dalla parte delle fibre tese: $\Delta R/R_0 = 0,063 \% \sim 0,8 \%$;
- post-delaminazioni dalla parte delle fibre tese: $\Delta R/R_0 = 2,656 \% \sim 5,054 \%$;
- rottura dei *layer* interni (-60°): $\Delta R/R_0 = 12 \% \sim 15 \%$;
- post-delaminazioni dalla parte delle fibre compresse: $\Delta R/R_0 = 16 \% \sim 30 \%$.

Parallelamente invece, con provini *cross-ply* $[0_2/90_4]_s$ si registra un incremento massimo pari a 94,3 % a seguito di delaminazioni complete dalla parte delle fibre tese e compresse, rottura dei *layer* interni (90°) e rottura completa delle fibre compresse.

Nonostante con le prove a flessione si siano raggiunte delle deformazioni dei campioni considerevoli, si ritengono i risultati ottenuti soddisfacenti, considerando le delaminazioni un danneggiamento assai ricorrente nell'ambito dei composti.

12.3 Suggerimenti per lavori futuri

Per eventuali lavori futuri, prosiegua della presente tesi, potrebbe essere interessante valutare:

- elettrodi saldati sulla superficie, per escludere qualsiasi disturbo in lettura da parte del movimento degli stessi [5];
- elettrodi posizionati al di fuori della zona di sollecitazione del campione, ad esempio sotto le *tab* [2];
- monitoraggio del danno con sollecitazioni a compressione assiale;
- cercare di distinguere le quote parti di ogni singolo contributo, quindi indagare nello specifico un fenomeno per volta, come ad esempio la sola influenza della temperatura senza danneggiare il provino, o delle sole cricche senza indurre altri danneggiamenti e aspettare eventualmente che si raffreddi il campione, o solo delaminazioni senza rottura delle fibre e cricche nella matrice ecc...;
- condurre dei test utilizzando corrente alternata (*AC*) e considerare eventuali effetti capacitivi.

12.4 Referenze

- [1] Angelidis N., Wei C.Y., Irving P.E., The electrical resistance response of continuous carbon fiber composite laminates to mechanical strain, *Composites Part A*, 35, 2004, p.1135-1147.
- [2] Vavouliotis A., Paipetis A., Kostopoulos V., *On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the Electrical Resistance Change method*, *Composite Science and Technology*, 71, 2011, p.630-642.
- [3] Akira Todoroki, Masahito Ueda, Yoshiyasu Hirano, *Strain and Damage Monitoring of CFRP Laminates by Means of Electrical Resistance Measurement*, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.1 No.8, 2007, p.947-974.
- [4] Ryosuke Matsuzaki, Akira Todoroki, *Wireless detection of internal delamination cracks in CFRP laminates using oscillating frequency changes*, *Composite Science and Technology*, 66, 2006, p.407-416.
- [5] Jacek Gadomski, Pawel Pyrzanowski, *Experimental investigation of fatigue destruction of CFRP using the electrical resistance change method*, *Measurement*, 87, 2016, p.236-245.